



TUGAS AKHIR (MO 141326)

ANALISIS DINAMIS OPERASI PENURUNAN *SUBSEA MANIFOLD*

DEDY OMPU SUNGGU
NRP. 4312 100 131

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
Murdjito, MSc .Eng

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



FINAL PROJECT (MO 141326)

DYNAMIC ANALYSIS OF SUBSEA MANIFOLD LOWERING OPERATION

DEDY OMPU SUNGGU
REG. 4312 100 131

Supervisors

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
Murdjito, MSc .Eng

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2016

Analisis Dinamis Operasi Penurunan *Subsea Manifold*

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Sarjana (S-1) Jurusan Teknik Kelautan**

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dedy Ompu Sunggu

NRP. 4312 100 131

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Murdjanto, M.Sc. (Eng) (Pembimbing 2)

3. Rudi Walujo Prastianto, S.T, M.T., Dr. Eng. (Penguji 1)

4. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2016

ANALISIS DINAMIS OPERASI PENURUNAN *SUBSEA MANIFOLD*

Nama : Dedy Ompu Sunggu
NRP : 4312 100 131
Jurusan : Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS.
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
Murdjito, M.Sc.Eng

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas analisis dinamis operasi penurunan sebuah *subsea manifold* yang dilakukan di *Field Jangkrik*, Lepas Pantai Kalimantan Timur. Analisis difokuskan pada tahapan ketika *subsea manifold* diturunkan melewati permukaan air laut (*splash zone*), sebab tahapan ini adalah yang paling kritis di dalam operasi penurunan. *Subsea manifold* yang diturunkan memiliki dimensi 13 m x 7.4 m x 4.2 m dengan berat 251 MT, struktur diturunkan dengan menggunakan kapal DCV *Aegir*. Operasi penurunan yang dianalisis terdiri atas 3 *load cases*, yaitu ketika *subsea manifold* berada tepat di atas permukaan air, sebagian berada di bawah permukaan air, dan tepat berada di bawah permukaan air. Sesuai dengan rekomendasi DNV-RP-H103, maka dilakukan simulasi *time domain* untuk tiap *load case* selama 3 jam. Hasil analisis yang ditinjau adalah respon gerak struktur *subsea manifold*, besar *tension* yang terjadi pada *sling*, serta batasan *sea-state* dimana operasi dapat dijalankan dengan aman sesuai dengan kriteria yang dipakai di industri. Respon gerak struktur *subsea manifold* yang paling besar terjadi pada saat struktur tepat berada di atas permukaan air laut, dengan *offset* signifikan pada tiap sumbu adalah: X = 8.54 m, Y = 10.35 m, dan Z = 1.01 m. *Offset* signifikan maksimum terjadi pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m dengan arah datang gelombang 90° . *Tension* signifikan maksimum terbesar terjadi pada *Load Case* 2, yang terjadi pada *sling* 1 dengan harga 914 kN pada saat tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m dengan arah datang gelombang 90° . Berdasarkan hasil analisis dan kriteria operasi penurunan yang direkomendasikan oleh DNV, maka batas aman tinggi signifikan gelombang untuk operasi masih dapat dijalankan adalah pada $H_s = 2.8$ m.

Kata Kunci: *Subsea Manifold, Operasi Penurunan, Splash Zone*

DYNAMIC ANALYSIS OF SUBSEA MANIFOLD LOWERING OPERATION

Name : Dedy Ompu Sunggu
REG : 4312 100 131
Department : Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology, ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
Murdjito, M.Sc.Eng

ABSTRACT

This final project put forward a study on the dynamic analysis of subsea manifold lowering operation that will be executed at Jangkrik Field, Offshore East Borneo. The analysis focuses on the splash zone lowering phase considering it is the most critical phase on the lowering operation. The subsea manifold has main frame dimension of 13 m x 7.4 m x 4.2 m and weight of 251 MT. The structure lowered by using Deep Water Construction Vessel (DCV) *Aegir*. The lowering analysis in this study comprised of three (3) load cases namely when the structure just right above the water surface, when the structure half submerged in the water, and when the structure just right below the water surface. As per DNV RP-H103 recommendation, time domain analysis was done on each case for 3 hours time span. The maximum significant offset of the structure happened in Load Case 1, when the structure just right above the water surface. The maximum offset on each axis direction is $X = 8.54$ m, $Y = 10.35$ m, $Z = 1.01$ m relative to its static position. The maximum significant tension happened in Load Case 2, when the structure half submerged in the water. The maximum significant tension imposed on Sling 1 found to be 914 kN, at the significant wave height $H_s = 3.8$ m and the wave heading is 90° . Based on the results of analysis, the maximum allowable sea-state is $H_s = 2.8$ m. Lowering operation beyond the aforementioned limit is considered unsafe.

Key Words: *Subsea Manifold, Lowering Operation, Splash Zone*

KATA PENGANTAR

Salam sejahtera,

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya oleh berkat dan kasih-Nya lah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Dinamis Operasi Penurunan *Subsea Manifold*” ini dengan baik.

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Program Studi Sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Tugas ini membahas karakteristik respons sebuah *subsea manifold* ketika sedang diturunkan kedalam laut dengan menggunakan sebuah *crane vessel*.

Penulis menyadari bahwa banyak terjadi kesalahan dan kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga saran dan kritik dari pembaca akan sangat membantu penulis untuk belajar menjadi lebih baik lagi. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca, terutama yang ingin melakukan penelitian dengan topik yang sama. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2016

Dedy Ompu Sunggu

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus atas kasih dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Penulis menerima banyak sekali bantuan baik secara moril dan materi, dan pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, terima kasih Bapak dan Mama atas doa dan dukungan yang tak pernah surut, juga kepada adik-adik penulis yang terus mendoakan dari jauh, terima kasih.
2. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., dan Bapak Murdjito, M.Sc.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis. Terima kasih atas ilmu dan bimbingan yang Bapak berikan.
3. Bapak Rudi W. P. sebagai Ketua Jurusan Teknik Kelautan serta seluruh staf pengajar dan karyawan Jurusan Teknik Kelautan, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.
4. Teman-teman penulis, Anak Rantau Manyar, dan teman-teman se-dosen bimbing yang terus memberikan dukungan dan menguatkan penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
5. Keluarga besar Varuna L-30 P-52 yang terus saling mendukung di setiap saat.
6. Mas Ali Akbar, Mas Iman Maulana, Mas Arifta Yahya, dan keluarga besar PT. ZEE Indonesia, terima kasih atas bantuannya dalam proses pengerjaan tugas akhir selama di Tangerang.
7. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebut satu-per-satu.

Semoga seluruh bantuan yang telah diberikan kepada penulis boleh menjadi sesuatu yang baik dan dibalas dengan kebaikan yang berlipat ganda oleh Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Dedy Ompu Sunggu

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori.....	8
2.2.1 Subsea Manifold	8
2.2.2 Analisis Instalasi Subsea Structure	9

2.2.3 Heavy Lift Vessel.....	9
2.2.4 Beban-beban di Splash Zone.....	10
2.2.4.1 Berat Struktur	10
2.2.4.2 Gaya-gaya Hidrodinamis	11
2.2.5 Penurunan melalui Splash Zone – Metode Sederhana	12
2.2.6 Koefisien Hidrodinamis	17
2.2.7 Teori Software OrcaFlex.....	19
2.2.8 Teori Dasar Gerakan Bangunan Apung	22
2.2.9 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler	23
2.2.10 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak.....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Metodologi Penelitian	31
3.2 Pengumpulan Data	34
3.2.1 Data Crane Vessel	34
3.2.2 Subsea Manifold	36
3.2.3 Data Lingkungan.....	37
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Skenario Operasi Penurunan	38
4.1.1 <i>Load Cases</i>	38
4.1.2 Beban Lingkungan	39
4.2 Pemodelan <i>Crane Vessel</i>	40
4.3 Karakteristik Gerak Kapal di Gelombang Regular	41
4.3.1 Karakteristik Gerak Kapal Moda Vertikal	42
4.3.2 Karakteristik Gerak Kapal Moda Horizontal	44

4.4	Pemodelan Struktur <i>Subsea Manifold</i> dan <i>Rigging System</i>	47
4.5	Respon Gerakan Struktur <i>Subsea Manifold</i>	50
4.5.1	Perbandingan Respons Gerak Struktur Untuk Tiap Load Case	51
4.5.2	Offset Signifikan Pada Sumbu X	55
4.5.3	Offset Signifikan Pada Sumbu Y	56
4.5.4	Offset Signifikan Pada Sumbu Z	57
4.7	Besar <i>Tension</i> pada <i>Sling</i> Selama Operasi	59
4.7.1	Besar <i>Tension</i> Signifikan Pada <i>Sling</i> untuk Load Case 1	60
4.7.2	Besar <i>Tension</i> Signifikan Pada <i>Sling</i> untuk Load Case 2	62
4.7.3	Besar <i>Tension</i> Signifikan Pada <i>Sling</i> untuk Load Case 3	65
4.8	Seastate Maksimum yang Diizinkan	66
4.8.1	Slack <i>Sling</i> Criterion	67
4.8.2	<i>Sling</i> Capacity Checks	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		69
5.1	KESIMPULAN	69
5.2	SARAN	70
Daftar Pustaka		71
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi subsea manifold yang sedang diturunkan ke dalam laut	1
Gambar 1.2 Tahap-tahapan proses penurunan subsea manifold	2
Gambar 2.1 Tampak ISO subsea manifold yang akan dianalisis	8
Gambar 2.2 Ilustrasi Heavy Lift Vessel	9
Gambar 2.3 Ilustrasi bagaimana drag force bekerja pada struktur	14
Gambar 2.4 Ilustrasi slamming pada subsea structure yang sedang diturunkan	15
Gambar 2.5 Ilustrasi mass force pada subsea structure yang sedang diturunkan	16
Gambar 2.6 Ilustrasi gaya apung yang bekerja pada subsea structure	17
Gambar 2.7 Ilustrasi gerakan Six Degree of Freedom pada bangunan kapal	22
Gambar 2.8 Ilustrasi gerakan Six Degree of Freedom pada bangunan kapal	23
Gambar 2.9 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung	25
Gambar 2.10 Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	31
Gambar 3.2 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Lanjutan)	32
Gambar 3.3 General Arrangement DCV Aegir	34
Gambar 3.4 General Arrangement DCV Aegir (Lanjutan)	35
Gambar 3.5 Dual Header Manifold	36
Gambar 3.6 Lokasi Field Jangkrik	37
Gambar 4.1 Load cases yang akan dianalisis	38
Gambar 4.2 Pemodelan lambung crane vessel dengan software Maxsurf	40
Gambar 4.3 Meshing model lambung crane vessel Aegir pada MOSES	40
Gambar 4.4 RAO gerakan heave untuk kapal kondisi free floating	42
Gambar 4.5 RAO gerakan roll untuk kapal kondisi free floating	43
Gambar 4.6 RAO gerakan pitch untuk kapal kondisi free floating	44
Gambar 4.7 RAO gerakan surge untuk kapal kondisi free floating	45
Gambar 4.8 RAO gerakan sway untuk kapal kondisi free floating	45

Gambar 4.9 RAO gerakan yaw untuk kapal kondisi free floating.....	46
Gambar 4.10 Tampak rigging system pada model.....	47
Gambar 4.11 Konfigurasi rigging yang dipakai dalam operasi	49
Gambar 4.12 Tampak subsea manifold sedang diangkat.....	49
Gambar 4.13 Sumbu-sumbu di dalam sistem	50
Gambar 4.14 Posisi subsea manifold terhadap kapal.....	51
Gambar 4.15 Profil gelombang untuk $H_s = 3.8$ m dan $T_z = 6.7$ s	51
Gambar 4.16 Time history respons gerak translasi pada sumbu-X	52
Gambar 4.17 Time history respons gerak translasi pada sumbu-Y	53
Gambar 4.18 Time history respons gerak translasi pada sumbu-Z.....	53
Gambar 4.19 Time history respons gerak rotasi pada sumbu-X.....	54
Gambar 4.20 Time history respons gerak rotasi pada sumbu-Y.....	55
Gambar 4.21 Grafik offset signifikan sumbu X.....	55
Gambar 4.22 Grafik offset signifikan sumbu-Y	57
Gambar 4.23 Grafik offset signifikan sumbu Z	58
Gambar 4.24 Grafik <i>tension</i> signifikan terhadap fungsi H_s	59
Gambar 4.25 Letak <i>subsea manifold</i> dan arah pembebanan.....	60
Gambar 4.26 Kondisi struktur berada di atas permukaan air laut.....	61
Gambar 4.27 Grafik kenaikan <i>tension</i> terhadap fungsi H_s – <i>Load Case 1</i>	61
Gambar 4.28 Kondisi struktur sebagian terbenam di dalam laut.....	63
Gambar 4.29 Grafik kenaikan <i>tension</i> terhadap fungsi H_s – <i>Load Case 2</i>	63
Gambar 4.30 Kondisi struktur sepenuhnya berada di dalam air laut	65
Gambar 4.31 Grafik kenaikan <i>tension</i> terhadap fungsi H_s – <i>Load Case 3</i>	65
Gambar 4.32 Grafik <i>tension</i> signifikan minimum	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum	28
Tabel 2.2 Spektrum gelombang untuk beberapa daerah	29
Table 3.1 Data spesifikasi crane vessel Aegir	35
Table 3.2 Data Berat dan Dimensi Subsea Manifold	36
Table 3.3 Data lingkungan yang dipertimbangkan di dalam analisis	37
Table 4.1 Ringkasan parameter gelombang	39
Table 4.2 Validasi model lambung crane vessel	41
Table 4.3 Ringkasan nilai RAO maksimum untuk tiap moda gerak	46
Table 4.4 Ringkasan data karakteristik crane yang dipakai dalam operasi	48
Table 4.5 Rangkuman properti rigging yang dipakai dalam operasi	49
Table 4.6 Offset signifikan sumbu-X	56
Table 4.7 Offset Signifikan Sumbu Y	57
Table 4.8 Offset signifikan sumbu-Z	58
Table 4.9 Rangkuman Tension signifikan Load Case 1	62
Table 4.10 Rangkuman Tension Signifikan Load Case 2	64
Table 4.11 Rangkuman Tension Signifikan Load Case 3	66
Table 4.12 Rangkuman nilai tension Load-Case-2	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Teknologi yang digunakan dalam eksplorasi dan produksi minyak dan gas berkembang sangat pesat seiring terus bergesernya trend eksplorasi ke laut dalam, *subsea production system*-pun menjadi teknologi yang paling banyak digunakan. Meskipun terbilang mahal, dengan teknologi ini produksi di laut dalam menjadi lebih hemat dibandingkan teknologi konvensional yang biasa dipakai di laut dangkal.

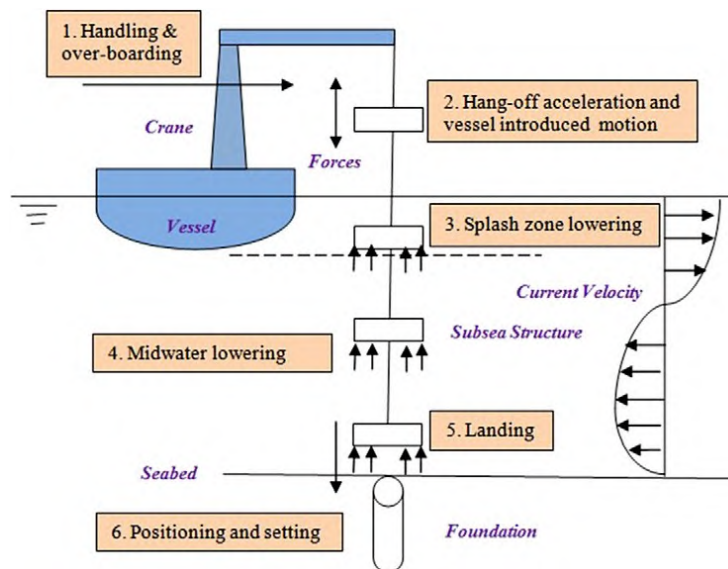
Salah satu komponen penting dari *subsea production system* adalah *subsea manifold*. *Subsea manifold* adalah susunan dari pipa-pipa dan/atau *valves* yang didesain untuk menggabungkan, mendistribusikan, mengontrol, dan sering juga didesain untuk memonitor aliran fluida dalam saluran produksi. (DNV GL. 2014)



Gambar 1.1 Ilustrasi *subsea manifold* yang sedang diturunkan ke dalam laut
(sumber: <http://www.offshore-technology.com>)

Untuk meletakkan *subsea manifold* ke dasar laut dilakukan operasi penurunan *subsea manifold* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.1. Operasi penurunan dilakukan dengan menggunakan sebuah *crane vessel* dengan cara mengangkat struktur dan menurunkannya ke dalam laut.

Operasi penurunan memiliki andil besar dalam biaya dan jadwal proyek, dan seringkali kunci kesuksesan dari operasi ini adalah kondisi *metocean site* dimana struktur diturunkan. Pada saat instalasi, struktur yang sedang diangkat terekspos terhadap beban-beban dinamis, baik yang diakibatkan gerakan dari *installation vessel* sendiri maupun beban langsung dari gelombang di zona permukaan air laut (*splash zone*). Tahapan-tahapan operasi penurunan *subsea structure* dapat dilihat di Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Tahap-tahapan proses penurunan *subsea manifold*
(Sumber : Handbook of Subsea Engineering, Bai & Bai. 2010.)

Sebelum menurunkan *subsea manifold* ke dalam laut, harus dilakukan analisis dinamis yang bertujuan untuk mencari tahu batasan *sea-state* dimana operasi masih dapat dijalankan dengan aman dengan mengacu pada hasil analisis dan standar yang berlaku di industri.

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis dinamis terhadap operasi penurunanan *subsea manifold* yang akan dilakukan di Lapangan Jangkrik, Lepas Pantai Kalimantan Timur, Indonesia, dengan menggunakan kapal DCV *Aegir* milik Hereema Marine Contractors.

Fokus penelitian ini adalah analisis dinamis pada saat *subsea manifold* diturunkan melalui permukaan air laut (*splash zone*), sebab dalam tahapan ini *subsea manifold* menerima beban-beban paling kritikal akibat eksitasi gelombang.

Analisis dinamis berbasis *time domain* akan dilakukan dengan menggunakan *software* OrcaFlex, dengan melakukan analisis ini diharapkan karakteristik respon gerak struktur terhadap eksitasi gelombang pada saat diturunkan melalui *splash zone* dan besaran *tension* pada *sling* selama operasi dapat diketahui dan dipahami. Hasil analisis yang sudah didapatkan kemudian dijadikan pertimbangan dalam membuat batasan *sea-state* maksimum untuk dijalankannya operasi dengan mengacu pada *acceptance criteria* dari DNV RP-H103.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Berapa besar respon gerakan *subsea manifold* saat diturunkan ke dalam laut?
2. Berapa besar *tension* yang terjadi pada *sling* saat operasi penurunan *subsea manifold* ke dalam laut?
3. Berdasarkan hasil analisis, berapa batas *allowable maximum sea-state* dalam operasi penurunan *subsea manifold* ini?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui besar respon gerakan struktur *subsea manifold* ketika diturunkan ke dalam laut.
2. Mengetahui besar *tension* yang terjadi pada *sling* selama operasi penurunan *subsea manifold* ke dalam laut.
3. Mengetahui batasan *allowable maximum sea-state* berdasarkan hasil analisis yang telah didapatkan.

1.4 Manfaat

Memahami karakteristik respon struktur *subsea manifold* akibat beban-beban dinamis yang bekerja selama operasi penurunan ke dalam laut, dan dengan berdasarkan

hasil analisis yang diperoleh, batasan *sea-state* maksimum dapat ditentukan untuk memastikan operasi penurunan *subsea manifold* ke dalam laut berjalan dengan aman.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. *Load cases* yang dipakai dalam analisa dibagi menjadi 3:
 - a) Ketika *subsea manifold* tepat berada di atas permukaan air,
 - b) Ketika *subsea manifold* sebagian berada di dalam air,
 - c) Ketika *subsea manifold* seluruhnya tepat berada di bawah permukaan air.
2. Subsea manifold yang akan diturunkan dalam operasi ini adalah sebuah *dual header manifold* dengan spesifikasi dimensi *main frame* 13 m x 7.4 m x 4.2 m dengan berat di udara sebesar 251 MT.
3. *Crane vessel* yang dipakai dalam operasi ini adalah *Deep Water Construction Vessel* (DCV) *Aegir* milik Heerema Marine Contractors dengan *displacement* sebesar 78489 Ton pada sarat air 10.5 m (sarat operasi).
4. Beban lingkungan yang dipertimbangkan adalah bebang gelombang.
5. Beban arus dan angin diabaikan dalam analisis.
6. Beban gelombang yang diperhitungkan adalah gelombang dengan variasi tinggi signifikan gelombang $H_s = 1.8$ s/d $H_s = 3.8$ dengan interval 0.5 m.
7. Zero up-crossing period yang dipertimbangkan $T_z = 4.5$ s/d $T_z = 6.7$ s sesuai dengan data *meta-ocean* Field Jangkrik yang telah diperoleh.
8. Tidak dilakukan analisis terhadap stabilitas dan *ballasting* dari *crane vessel* yang digunakan dalam instalasi.
9. Struktur kapal dan *subsea manifold* dianggap *rigid body*.
10. Tidak dilakukan perhitungan pergeseran titik berat (*CoG-Shift*) pada struktur saat operasi dijalankan.
11. *Dynamic Positioning System* pada crane vessel tidak dimodelkan.
12. Pengaruh gelombang yang dikaji dalam operasi penurunan *subsea manifold* ini adalah gelombang dari arah 0° , 45° , 90° , 135° dan 180° .

13. Simulasi *time domain* dilakukan selama periode 3 jam untuk tiap *load case* menggunakan *software* OrcaFlex.
14. Perhitungan beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur pada saat operasi penurunan melalui *splash zone* mengacu pada *code* DNV RP H-103.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

I. Pendahuluan

Bab ini membahas latar belakang tugas akhir yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam pengerjaan tugas akhir, manfaat yang diperoleh, dan batasan-batasan masalah yang dijadikan acuan dalam penelitian pada tugas akhir ini.

II. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini berisi tinjauan pustaka, penulis berpedoman pada hasil-hasil penelitian berupa jurnal, thesis, buku-buku dan *codes* yang terkait instalasi *subsea structure*. Dalam bab ini juga disertakan dasar-dasar teori yang digunakan dalam analisis.

III. Metodologi Penelitian

Bab ini berisi penjelasan tentang metode yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir serta prosedur pengerjaannya, proses pengumpulan data dan validasi model-model yang telah dibuat untuk simulasi *time domain*.

IV. Analisis dan Pembahasan

Pada bagian ini dibahas proses dan hasil analisis respon gerak struktur terhadap eksitasi gelombang, besar *tension* maksimum dan minimum untuk tiap *load cases* serta batasan *sea-state* dimana operasi masih dapat dijalankan.

V. Penutup

Pada bab ini akan dibahas kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan dan juga berisi saran bagi pembaca yang tertarik melakukan penelitian yang berhubungan dengan penelitian ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada saat instalasi, struktur yang sedang diangkat terekspos beban-beban dinamis, baik yang diakibatkan gerakan dari *installation vessel* sendiri maupun beban langsung dari gelombang di permukaan air laut (*splash zone*). Tahap-tahap dalam instalasi *subsea manifold* dengan metode *lifting* normalnya adalah sebagai berikut:

- *Barge lift*: pengangkatan module dari deck oleh crane vessel;
- *Splash zone lowering*: penurunan module melalui splash zone;
- *Lowering in deep water*: lowering analysis pada critical resonance depth;
- *Landing on the seabed*: Pendaratan struktur ke dasar laut.

Dalam kebanyakan operasi penurunan, fase penurunan melalui permukaan laut (*splash zone*) merupakan fase paling kritis. Dalam operasi penurunan yang menggunakan metode *lifting*, operasi ini dapat digolongkan menjadi heavy lift operation dan light lift operation. Heavy lift operation adalah operasi dimana berat struktur yang diangkat lebih atau sama dengan 1-2 % besar displasmen kapal. Sedangkan light lift operation adalah ketika berat struktur yang diangkat kurang dari 1-2 % displasmen kapal, dan objek yang diangkat tidak mempengaruhi gerakan kapal (DNV, 2011).

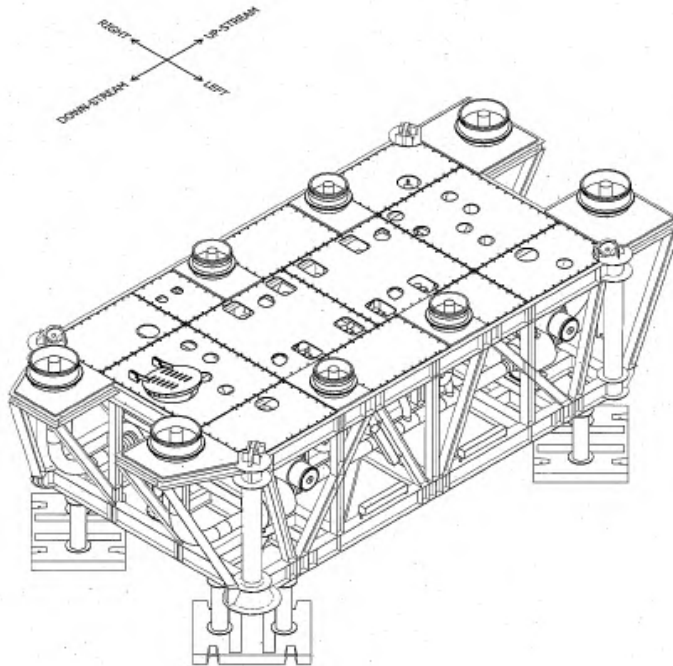
Di laut dalam, kontribusi dari aktivitas instalasi terhadap jadwal dan biaya proyek jauh lebih tinggi dibandingkan dengan di laut dangkal. Resiko dari aktivitas instalasi di laut dalam juga jauh lebih tinggi, dan seringkali faktor kunci dalam aktivitas ini merupakan kondisi *meta-ocean* dari laut tempat *subsea manifold* diinstal (Bai dan Bai, 2010).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Subsea Manifold

Subsea manifold merupakan komponen penting dari sebuah *subsea production system*. *Subsea manifold* telah lama dipakai dalam pengembangan banyak lapangan gas dan minyak dengan tujuan menyederhanakan *subsea system*, meminimalkan penggunaan *subsea pipeline* dan *risers*, juga mengoptimasi aliran fluida dalam sistem produksi.

Subsea manifold adalah *manifold* yang diinstal di dasar laut sejajar dengan sumur, manifold sendiri adalah *structural frame* dengan susunan pipa-pipa dan/atau *valves* di dalamnya yang didesain untuk menggabungkan, mendistribusikan, mengontrol, dan sering juga didesain untuk memonitor aliran fluida dalam saluran produksi.



Gambar 2.1 – Tampak ISO Subsea Manifold yang Akan Dianalisis
(Sumber : Construction Drawing Subsea Manifold)

2.2.2 Analisis Instalasi Subsea Structure

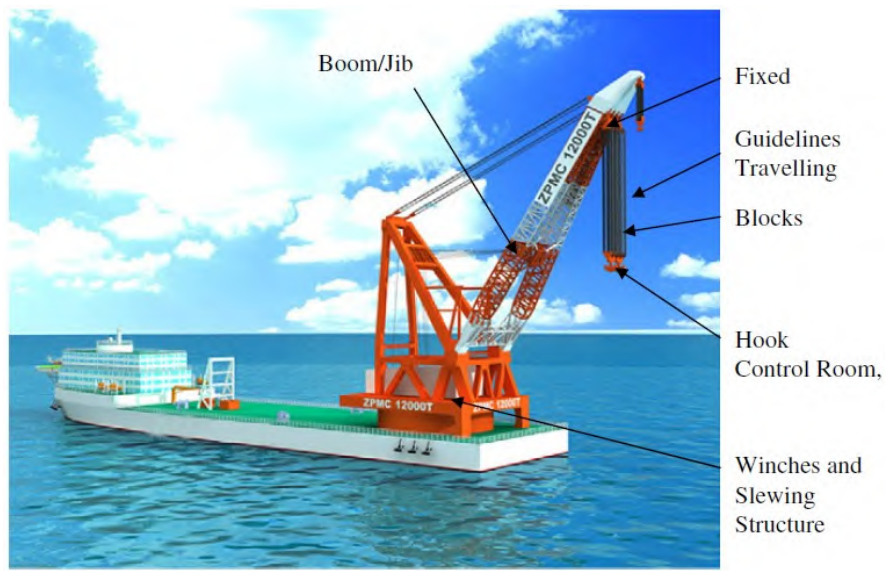
Analisis instalasi dapat dibagi menjadi dua tahap: tahap pertama adalah analisis statis tanpa beban lingkungan apapun, dan tahap kedua adalah analisis dinamis dengan beban lingkungan seperti gelombang dan arus.

Analisis statis menjelaskan hubungan antara posisi *crane vessel*, pembebanan pada *sling* dan tegangan pada sistem pada kondisi statis. Analisa dinamis dilakukan untuk sistem yang berada di bawah beban lingkungan dengan tujuan mengetahui besar *maximum allowable sea states* dan *maximum tension*, serta gerakan dari struktur yang sedang diinstal. Analisis dilakukan untuk berbagai macam rentang tinggi dan periode gelombang.

Model yang dianalisis terdiri dari installation vessel yang sudah diasosiasikan dengan RAO-nya, sebuah *crane* dengan *winch wires*, dan *rigging system* juga *equipment* yang *diinstall*. Installation vessel yang dipakai dalam analisis adalah *heavy lift vessel* berupa *crane barge*.

2.2.3 Heavy Lift Vessel

Heavy lift vessel merupakan sebuah *vessel* dengan *crane* yang memiliki kapasitas angkat besar yang biasanya mencapai ribuan ton. Untuk struktur yang cukup besar dan berat seperti subsea manifold template, *heavy lift vessel* biasanya dipakai untuk operasi instalasi. Kapasitas angkat kebanyakan *heavy lift vessels* biasanya berkisar antara 500 dan 1000 ton. Stabilitas dan *sea-keeping abilities* adalah karakter yang paling penting dari *heavy lift vessel*.



Gambar 2.2 - Ilustrasi Heavy Lift Vessel
(Sumber : Subsea Engineering Handbook, Bai dan Bai. 2010)

2.2.4 Beban-beban di Splash Zone

Struktur yang diturunkan melalui permukaan air laut tepapar beban-beban yang bervariasi dan non-linier. Dengan secara akurat memprediksi beban-beban tersebut, *downtime* dari *operational vessel* dapat dikurangi dan meningkatkan keselamatan dari operasi yang dilakukan.

2.2.4.1 Berat Struktur

Berat terbenam struktur W didapatkan dengan menjumlahkan berat struktur di udara W_0 dengan gaya apung struktur F_B . Kedua gaya saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga membuat berat terbenam sebuah struktur lebih rendah jika dibandingkan dengan bertanya di udara.

$$W = W_0 - F_B = M_S - \rho V g \dots \dots \dots (2.1)$$

M_S merupakan berat struktur di udara, V merupakan volume objek yang terendam di dalam air, ρ merupakan massa jenis air laut, dan g merupakan percepatan gravitasi bumi.

2.2.4.2 Gaya-gaya Hidrodinamis

Beban-beban hidrodinamis yang muncul di *splash zone* dideskripsikan oleh Faltinsen dalam *linear dynamic loads and motions of structure in regular wave* (Faltinsen, 1990). Beban yang terjadi dapat dibagi menjadi dua permasalahan, yaitu:

- *Radiation problem*
- *Wave excitation problem*

Beban-beban hidrodinamis yang bekerja dalam radiation problem adalah massa tambah, *damping* dan *restoring force*. Sedangkan *wave excitation problem* terdiri atas Froude-Kriloff dan *diffraction force*. Karena ke-linieritas atas keduanya maka keduanya dapat dijumlahkan menjadi gaya hidrodinamis F_H . Persamaan untuk menghitung gerak vertikal struktur (Oritsland and Lehn, 1989) adalah sebagai berikut:

$$F_H + W + F_L = M_{\ddot{x}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan mengasumsikan bahwa badan struktur kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang, *wave diffraction force* yang disebabkan oleh struktur dapat diabaikan, namun kemudian hal ini akan berpengaruh pada *lift line force* F_L yang terlalu konservatif. Hal seperti ini sering diaplikasikan pada *sea-states* dengan gelombang yang pendek (Kopsov dan Sandvik, 1995).

Radiation force F_R bergantung pada kecepatan objek \dot{x} dan percepatan objek \ddot{x} . Gaya hidrodinamis yang bekerja pada struktur bergantung pada jarak struktur ke permukaan air (*free surface*) (Sandvik et al., 1993).

$$F_R = \frac{d}{dt}(M_{\dot{x}}) + B_1 \ddot{x} + B_2 \dot{x} |\dot{x}| \dots \dots \dots (2.3)$$

Wave force F_W , bergantung pada kecepatan v_w dan percepatan a_w partikel air dapat dilihat dalam persamaan:

$$F_W = \rho V a_w + \frac{d}{dt}(A_{33} v_w) + F_D \dots \dots \dots (2.4)$$

Bagian pertama dari persamaan di atas adalah *pressure gradient* yang disebabkan oleh gelombang, bagian kedua adalah perubahan dalam fluid momentum,

yang mana juga diasosiasikan dengan *slamming force*. F_D adalah gaya *drag* yang bergantung pada kecepatan dan percepatan partikel air.

Total gaya hidrodinamis yang bekerja pada struktur didapatkan dengan menjumlahkan *body reaction force* dan *wave force*. Persamaan berikut menunjukkan persamaan gerak struktur akibat *vertical relative velocity* antara objek dan partikel air (Oritsland and Lehn, 1989):

$$\underbrace{(M_S + A_{33})\ddot{x}}_{\text{Inertia force}} = \underbrace{B_1 v_r}_{\text{Linear damping}} + \underbrace{B_2 v_r |v_r|}_{\text{Quadratic damping}} + \underbrace{(\rho V + A_{33})a_w}_{\text{Wave forces}} + \underbrace{\frac{dA_{33}^\infty}{dt} v_r}_{\text{Slamming}} - \underbrace{W}_{\text{Weight}} + \underbrace{F_L(t)}_{\text{Line force}} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.5 Penurunan melalui Splash Zone – Metode Sederhana

Bagian ini berisi teori tentang metode yang disederhanakan (*simplified method*) untuk mengestimasi karakteristik beban-beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur yang sedang diturunkan melalui *splash zone*. Yang membedakan *simplified method* dengan *general method* adalah pada hasil yang diberikan, *simplified method* memberikan hasil yang sederhana dan konservatif dalam mengestimasi beban-beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur.

Asumsi dasar yang harus dipenuhi dalam metode ini adalah sebagai berikut:

- Gerakan vertical dari objek yang diangkat mengikuti gerakan dari ujung *crane* (*crane tip motion*)
- *Load case* didominasi oleh gerakan vertical relative antara objek dan air – mode gerakan lain boleh diabaikan.
- *Horizontal extent* dari objek yang diangkat (dalam arah persebaran gelombang) relatif kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang.

2.2.5.1 Berat Statis

Berat statis dari sebuah struktur yang tenggelam didapatkan dari persamaan berikut,

$$F_{static} = Mg - \rho Vg \dots\dots\dots (2.6)$$

Di mana,

M = Massa dari objek ketika di udara [kg]

g = Percepatan diakibatkan oleh gravitasi = 9.81 [m/s²]

ρ = Densitas air laut = 1025 [kg/m³]

V = volume dari air yang dipindahkan selama tahap-tahap penurunan objek melalui permukaan air (m³)

2.2.5.2 Beban Hidrodinamis

Karakteristik beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur ketika struktur sedang diturunkan melalui permukaan air adalah fungsi terhadap waktu dari beban-beban berikut:

- *Slamming impact force*
- *Varying buoyancy*
- *Hydrodynamic mass force*
- *Drag force*

Karakteristik beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur yang diturunkan dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$F_{hyd} = \sqrt{(F_D + F_{slam})^2 + (F_M - F_\rho)^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana,

F_D = *drag force* [N]

F_{slam} = *slamming impact force* [N]

F_M = *hydrodynamic mass force* [N]

F_ρ = *varying buoyancy force* [N]

2.2.5.3 Gaya Drag

Karakteristik gaya drag yang bekerja pada struktur dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$F_{Di} = 0.5\rho C_D A_{pi} V_r^2 \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana,

ρ = massa jenis air laut = 1025 [kg/m³]

C_D = koefisien gesek / *drag coefficient*

A_{pi} = luas area yang berada di bawah permukaan air [m²]

v_r = kecepatan relative antara objek yang diangkat dan partikel air [m/s]

Kecepatan relatif antara objek dan partikel air dapat dihitung melalui persamaan berikut:

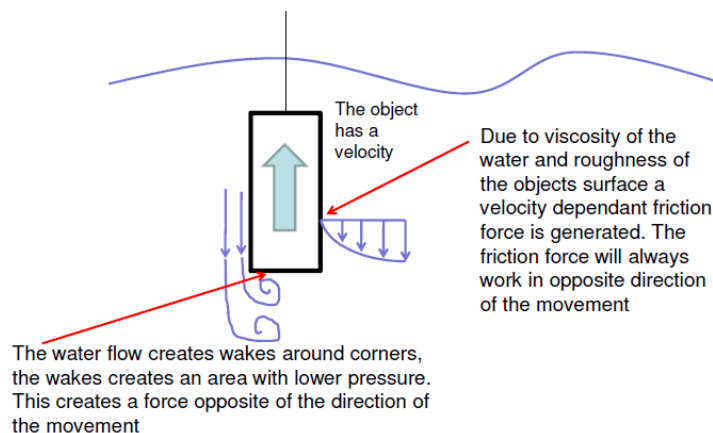
$$v_r = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana,

v_c = *lowering velocity*/kecepatan menurunkan, biasanya 0.5 [m/s]

v_{ct} = *single amplitude vertical velocity* dari ujung *crane* [m/s]

v_w = *vertical water velocity* [m/s]



Gambar 2.3 Ilustrasi bagaimana gaya *drag* bekerja pada struktur
(Sumber : *Engineering Optimization by using the Simplified Method for Lifting Through Splash Zone*. Arnstein Hosaas. 2010)

2.2.5.4 Slamming Impact Force

Slamming impact force yang bekerja pada struktur yang diturunkan melalui permukaan air bisa didapatkan melalui persamaan berikut:

$$F_{slam} = 0.5\rho C_s A_s V_s^2 \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana,

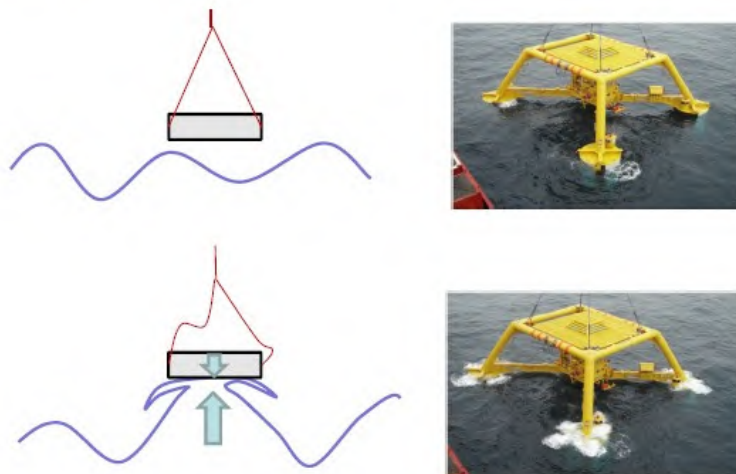
ρ = massa jenis air laut = 1025 [kg/m³]

C_s = *slamming coefficient* – nilainya mengacu pada DNV-RP-C205

A_s = *slamming area* [m²]

v_s = *slamming impact velocity* [m/s]

Slamming:



Gambar 2.4 Ilustrasi slamming pada subsea structure yang sedang diturunkan
(Sumber : *Engineering Optimization by using the Simplified Method for Lifting Through Splash Zone*. Arnstein Hosaas. 2010)

Kecepatan relatif antara objek dan partikel air dapat dihitung melalui persamaan berikut,

$$v_s = v_c + \sqrt{v_{ct}^2 + v_w^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana,

- v_c = hook hoisting/lowring velocity/kecepatan menurunkan, biasanya 0.5 [m/s]
 v_{ct} = single amplitude vertical velocity dari ujung crane [m/s]
 v_w = vertical water velocity [m/s]

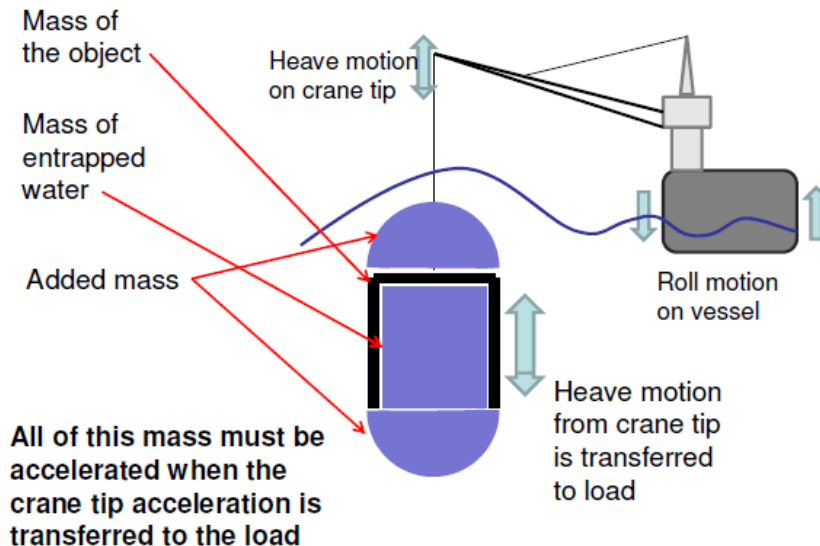
2.2.5.5 Mass Force

Karakteristik *mass force* pada objek yang diturunkan akibat perbedaan kecepatan antara air dan partikel air didapatkan melalui persamaan berikut:

$$F_{Mi} = \sqrt{[(M_i + A_{33i})a_{ct}]^2 + [(\rho V_i + A_{33i})a_w]^2} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana,

- M_i = massa dari objek ketika berada di udara [kg]
 A_{33i} = *heave added mass* dari objek [kg]
 a_{ct} = single amplitude acceleration dari ujung crane [m/s^2]
 ρ = massa jenis air laut = 1025 [kg/m^3]
 V_i = volume dari air yang dipindahkan oleh objek relatif terhadap rata-rata permukaan air [m^3]
 a_w = vertical water acceleration [m/s^2]



Gambar 2.5 – Ilustrasi *mass force* pada subsea structure yang sedang diinstall
 (Sumber : Engineering Optimization by using the Simplified Method for Lifting Through Splash Zone. Arnstein Hosaas. 2010)

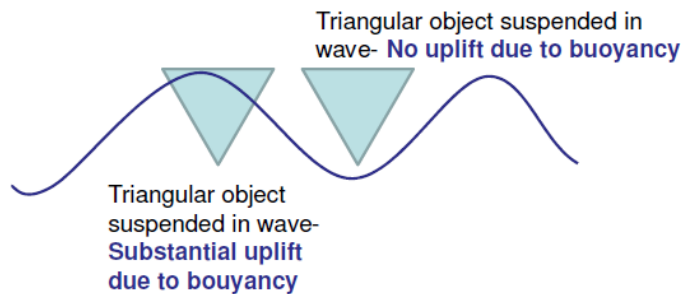
2.2.5.6 Varying Buoyancy Force

Perubahan daya apung dikarenakan ketinggian permukaan gelombang dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_p = \rho \cdot \delta V \cdot g \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana,

- ρ = densitas air laut = 1025 [kg/m³]
- δV = perubahan volume air yang dipindahkan [m³]
- g = percepatan gravitasi [m/s²]



Gambar 2.6 – Ilustrasi gaya apung yang bekerja pada *subsea structure* ketika diinstall
(Sumber : Engineering Optimization by using the Simplified Method for Lifting Through Splash Zone. Arnstein Hosaas. 2010)

Perubahan volume air yang dipindahkan dapat diestimasi sebagai berikut:

$$\delta V = \tilde{A}_w \cdot \sqrt{\zeta_a^2 + \eta_{ct}^2} \dots \dots \dots (2.14)$$

- \tilde{A} = mean water line area [m²]
- ζ_a = amplitudo gelombang / wave amplitude [m]
- η_{ct} = single amplitude vertical motion dari ujung crane [m]

2.2.6 Koefisien Hidrodinamis

Melakukan evaluasi dengan baik terhadap koefisien hidrostatik struktur yang diturunkan ke dalam air laut merupakan suatu aspek penting dalam menentukan beban gelombang dan respons gerakan dari struktur yang diangkat. Properti hidrodinamis bergantung pada geometri struktur, Reynolds Number dan Keulegan-Carpenter

Number. Arah gerakan, frekuensi aliran dan jarak struktur ke permukaan air juga merupakan suatu parameter penting. Parameter hidrodinamis sebuah objek dapat diestimasi baik secara teoritikal, empiris, atau dengan sebuah model test.

2.2.6.1 Massa tambah

DNV memberikan rekomendasi koefisien massa tambah untuk benda 2 dan 3 dimensi sederhana yang diberikan di dalam Recommended Practice. Umumnya, massa tambah struktur yang memiliki celah (*perforated*) ditentukan dengan menggunakan added mass struktur yang tak bercelah, lalu untuk memberikan efek perforasi nilai massa tambah dikalikan dengan faktor pengurang.

Di studi yang dilakukan oleh Kopsov dan Sandvik (1995) dan Sandvik et al. (1993) didapatkan kesimpulan bahwa perforasi mengurangi massa tambah struktur namun menaikkan kontribusi gaya *drag*.

2.2.6.2 Gaya Drag

Koefisien *drag* pada sebuah aliran yang berosilasi biasanya 2 sampai 3 kali lebih besar jika dibandingkan dengan koefisien drag pada air aliran air yang tetap (Oritsland dan Lehn, 1989). Koefisien drag pada struktur yang didominasi oleh inersia harus dipilih dengan sangat hati-hati karena dapat memberikan damping yang tidak realistis pada sistem (Sarkar dan Gumestad, 2010).

O. Oritsland menyediakan koleksi data hidrodinamis dari beberapa *complex subsea structure* (Oritsland, 1989). Oritsland mengklasifikasikan *subsea structure* menjadi tiga kategori:

- *Buoyant type* – struktur yang bear dengan frame work dan neutral buoyancy
- *Working tool* – bagian pusat yang berat, rasio massa/*buoyancy* yang besar dan *added mass* tidak begitu berpengaruh
- *Plate shaped structure* – *added mass* dan *drag* yang besar di arah vertikal namun kecil di arah horizontal

2.2.7 Teori Software OrcaFlex

OrcaFlex merupakan sebuah *software finite element* berbasis *time domain* yang umum digunakan dalam industri lepas pantai. Software ini dikembangkan oleh Orcina, dan digunakan untuk analisis statis dan dinamis struktur lepas pantai seperti risers, mooring systems, instalasi dan towed systems. Teori berikut yang akan dijelaskan mengacu pada OrcaFlex User Manual, Orcina (2011).

2.2.7.1 Analisis

Analisis statis dilakukan untuk menentukan posisi kesetimbangan (*equilibrium position*) sebuah sistem yang akan digunakan dalam analisis dinamis. Analisis dinamis dibagi menjadi dua langkah, yang pertama adalah *build-up period*, dimana gelombang dan gerakan dari sistem dibangun dari kondisi diam ke kondisi terbangun penuh. Langkah kedua dalam analisis dinamis adalah simulasi dimana *dynamic equation* dari gerakan diselidiki.

2.2.7.2 Lingkungan

Wave train di OrcaFlex bisa diatur menjadi sebuah *regular wave*, *random wave*, atau gelombang yang dispesifikasikan dengan sebuah *time history*.

2.2.7.3 Sistem Koordinat

Orcaflex membedakan koordinat global dan koordinat lokal dari sebuah sistem. Koordinat global sistem dinotasikan sebagai GXYZ, dimana G adalah *global origin* dan GX, GY dan GZ adalah axis di dalam koordinat sistem global. Setiap objek yang dimodelkan memiliki masing-masing koordinat sistem lokal, yaitu Lxyz. Koordinat sistem menggunakan kaidah tangan kanan dengan rotasi positif searah jarum jam.

2.2.7.4 Objek

Vessel

Vessel bebas bergerak dalam enam derajat kebebasan, tiga gerak translasi (surge, sway and heave) and tiga gerak rotasi (roll, pitch dan yaw). Gerakan dari vessel ditentukan oleh RAO yang diinput ke dalam properti kapal.

6D Buoy

6D-buoy adalah sebuah *rigid body* dengan enam derajat kebebasan, tiga gerak translasi dan tiga rotasi. Beban-beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur dihitung dengan persamaan Morison.

$$F_w = (\Delta a_w + C_a \Delta a_r) + \left(\frac{1}{2} \rho C_d A v_r |v_r| \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Bagian pertama dari persamaan Morison merepresentasikan inersia, yang mana adalah bergantung pada percepatan partikel air. A adalah massa dari air yang dipindahkan, a_w adalah percepatan partikel air relatif terhadap bumi, C_a adalah koefisien massa tambah dan a_r adalah percepatan partikel air relatif terhadap *buoy*. Bagian kedua adalah gaya *drag* yang bergantung pada kecepatan partikel air. C_d adalah koefisien *drag* untuk *buoy*, A adalah luasan daerah yang terkena gaya *drag*, dan v_r adalah kecepatan relative partikel air terhadap *buoy*.

OrcaFlex memiliki tiga tipe 6D buoy, yaitu *lumped buoy*, *spar buoy* dan *towed fish*. *Lumped buoy* didefinisikan tanpa geometri yang mendetail. *Roll* dan *pitch stiffness* tidak dapat dikalkulasi oleh *lumped buoy*, ini memiliki konsekuensi yang berujung pada tidak akuratnya hasil saat memodelkan buoy yang menembus *free surface*.

Saat menghitung *buoyancy* dari sebuah *lumped buoy*, *lumped buoy* dianggap sebagai sebuah *vertical stick element* dengan panjang yang sudah ditentukan. *Buoyancy* berubah secara linear mengikuti posisi dari *buoy*, tanpa memperhitungkan orientasi dari *buoy*.

Beban-beban hidrodinamis dari sebuah *lumped buoy* dihitung pada pusat volume daerah yang basah, dengan mengacu pada *fluid kinematics* pada posisi tersebut. Beban kemudian diskalakan dengan sebuah *scaling factor* yang sebanding dengan

proporsi bagian yang tercelup. Untuk memodelkan penetrasi melewati permukaan air dengan lebih akurat, diperlukan informasi geometri yang lebih detail.

Spar buoys adalah kumpulan sebuah silinder yang diletakkan satu di atas yang lain, dan memiliki *geometrical input* yang lebih lengkap dibanding *lumped buoy*. *Spar buoy* mirip dengan *towed fish*, hanya saja *spar buoy* memiliki axis yang vertikal dan *towed fish* memiliki axis horizontal. Karena input geometri yang lebih mendetail, maka *spar buoys* dan *towed fish* lebih akurat untuk model yang mempenetrasi permukaan air laut.

Karena 6D *buoy* dapat berotasi dalam 3 derajat kebebasan, maka *buoy* memerlukan input nilai untuk *rotational force*. Disebabkan kurangnya sumber yang membahas tentang hydrodynamic inertia dari sebuah rotating bodies, OrcaFlex menyarankan untuk menggunakan momen inertia dari massa yang ter-displaced. Momen inersia pada sumbu x, y, dan z dari sebuah *buoy* yang berbentuk persegi diberikan dalam persamaan:

$$\begin{aligned}\Delta I_x &= \frac{\Delta}{12} (y^2 + z^2) \\ \Delta I_x &= \frac{\Delta}{12} (y^2 + z^2) \dots \dots \dots (2.16) \\ \Delta I_x &= \frac{\Delta}{12} (y^2 + z^2)\end{aligned}$$

Untuk menghitung moment area yang dipakai dalam perhitungan drag moment, dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}MA_{dragx} &= \frac{x}{32} (y^4 C_{dz} + z^4 C_{dy}) \\ MA_{dragy} &= \frac{y}{32} (x^4 C_{dz} + z^4 C_{dx}) \dots \dots \dots (2.17) \\ MA_{dragz} &= \frac{z}{32} (x^4 C_{dz} + y^4 C_{dy})\end{aligned}$$

3D Buoy

3D *Buoy* adalah sebuah *buoy* yang memiliki tiga derajat kebebasan dan tidak dapat berotasi. Property yang dapat dimasukkan pada sebuah 3D *buoy* adalah berat,

buoyancy, *drag*, massa tambah, dan *reaction forces*. Properti pada sebuah 3D *buoy* dapat juga diabaikan dengan tujuan untuk memodelkan *nodes* di dalam sistem.

Winch

OrcaFlex menyediakan dua pilihan untuk *winch*, yaitu *simple* dan *detailed*. *Simple winch* adalah sebuah *massless winch* dan inersia dari winch diabaikan. Simple winch direkomendasikan untuk dipakai kecuali karakteristik winch yang lebih detail sangat mempengaruhi sistem dan penting untuk dimodelkan.

Links

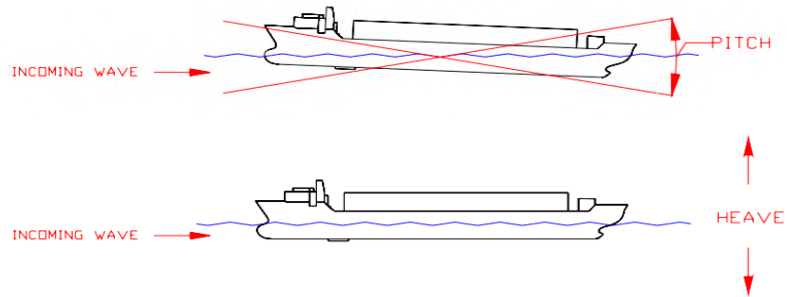
Links di OrcaFlex dapat dimodelkan sebagai *tether* atau *spring-damper system*. *Tether* adalah sebuah pengikat elastis yang hanya dapat menghitung *tension*, sedangkan *spring-damper system* dapat menghitung *tension* dan *compression*.

2.2.8 Teori Dasar Gerakan Bangunan Apung

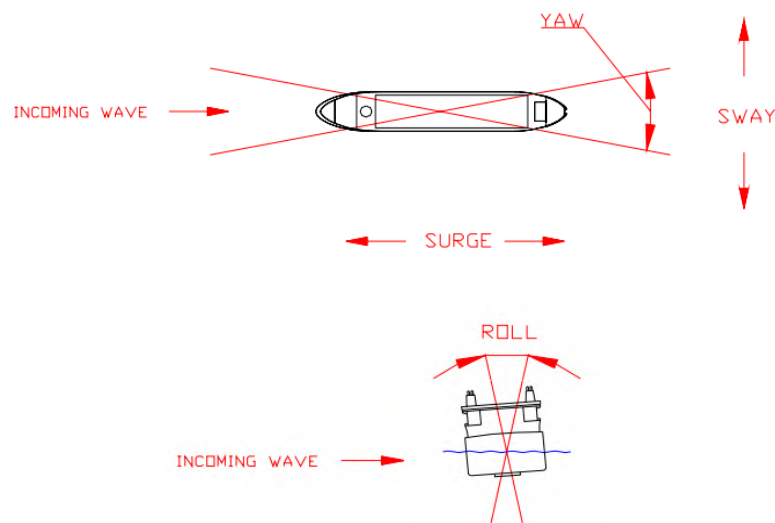
Bangunan apung memiliki enam mode gerakan bebas (*Six Degree of Freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional dalam 3 arah sumbu (Battacharyya, 1978).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7, berikut adalah penjelasan keenam mode gerakan tersebut :

1. Mode Gerak Translasional
 - *Surge*, gerakan transversal arah sumbu x
 - *Sway*, gerakan transversal arah sumbu y
 - *Heave*, gerakan transversal arah sumbu z
2. Mode Gerak Rotasional
 - *Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x
 - *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y
 - *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z



2.7 Ilustrasi gerakan *Six Degree of Freedom* pada bangunan kapal
(HSE, 2006)



Gambar 2.8 Ilustrasi gerakan *Six Degree of Freedom* pada bangunan kapal

2.2.9 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler

2.2.9.1 Teori Gelombang Reguler

Dengan mengasumsikan kondisi dasar laut adalah rata dan batasan horisontal pada permukaan bernilai tak hingga maka teori gelombang linear atau yang lebih dikenal dengan teori gelombang Airy dapat diterapkan.

Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur.

Teori gelombang Airy juga bisa disebut dengan teori gelombang amplitudo kecil, yang menjelaskan bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut. Periode gelombang diasumsikan sebagai variable konstan yang tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika dilaut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka periodenya akan tetap 10 detik selama gelombang tersebut menjalar. Nama Teori Gelombang Airy merupakan penghargaan kepada Sir. George Biddell Airy (1845) yang telah menemukan teori ini.

2.2.9.2 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu, ζ_{k0} , dengan amplitudo gelombang, ζ_0 . Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan:

$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

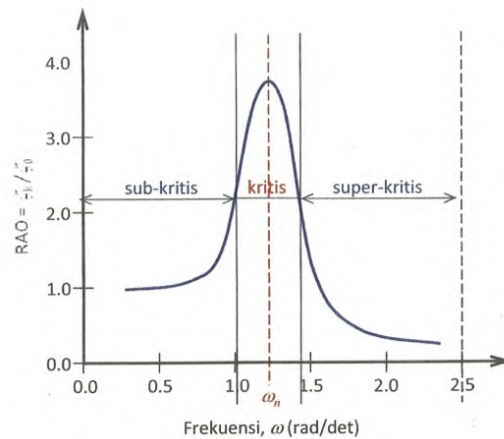
$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan di atas.

Sedangkan untuk respon gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan

kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djtmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \dots \dots \dots (2.19)$$



Gambar 2.9 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Djtmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 3.9, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang.

Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.

- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

2.2.10 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak

2.2.10.1. Respons Bangunan Apung pada Gelombang Acak

Respons bangunan apung pada khususnya kapal yang diakibatkan oleh eksitasi gelombang acak telah diperkenalkan pertama kali oleh St. Denis dan Pierson (1953). Gerakan bangunan apung dalam kondisi ideal dapat dihitung sebagai reaksi adanya eksitasi gelombang sinusoidal, dengan karakteristik tinggi atau amplitudo dan frekuensi tertentu. Perhitungan kemudian dilakukan dengan mengambil amplitudo gelombang yang konstan, namun harga frekuensinya divariasikan dengan interval kenaikan tertentu.

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen pembentuknya yang berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah tidak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang mempunyai tingkat energi tertentu yang dikontribusikan, yang kemudian secara keseluruhan diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang (Djarmiko, 2012).

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping* dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai

respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan respon struktur secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan :

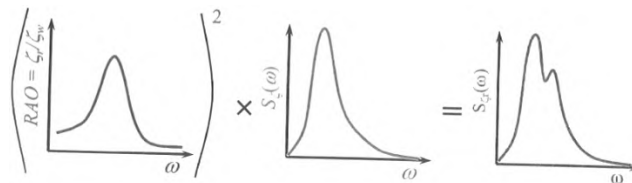
S_R = spektrum respons (m^2 -sec)

$S(\omega)$ = spektrum gelombang (m^2 -sec)

$RAO(\omega)$ = *transfer function*

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

$RAO^2 \times \text{Wave Spectrum} = \text{Response Spectrum}$
--



Gambar 2.10 - Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons

(Djarmiko, 2012)

2.2.10.2. Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum energi gelombang untuk memperoleh respon spektra suatu struktur didasarkan pada kondisi real laut yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan. Dari spektrum gelombang dapat diketahui parameter-parameter gelombang:

Tabel 2.1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1.25\sqrt{m_0}$	$2.5\sqrt{m_0}$
Gelombang signifikan	$2.00\sqrt{m_0}$	$4.00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2.55\sqrt{m_0}$	$5.00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/1000 gelombang tertinggi	$3.44\sqrt{m_0}$	$6.67\sqrt{m_0}$

dengan:

$$m_0 = \text{Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)} = \int_0^{\omega} S_{(\omega)} d\omega$$

Analisis spektrum gelombang dapat menggunakan beberapa teori spektrum gelombang yang telah ada, antara lain model spektrum JONSWAP, *Pierson-Moskowitz*, Bretshneider, ISSC ataupun ITTC. Model matematik spektrum secara umum didasarkan pada satu atau lebih parameter, misalnya tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, faktor permukaan, dan lain-lain.

Salah satu model spektra adalah yang diajukan oleh Pierson Morkowitz pada 1964 dan masih secara luas digunakan. Aplikasi umum dari satu parameter spektrum gelombang *Pierson-Moskowitz* dibatasi oleh fakta jika kondisi laut adalah *fully developed*. Pengembangan dari laut juga dibatasi oleh *fetch*. Setelah itu, mulai dikembangkan suatu spektrum untuk perairan dengan batasan fetch tertentu. Dimana spektrum tersebut merupakan turunan dari spectra *Pierson-Moskowitz*, yakni diketahui sebagai *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP).

Pada Tugas Akhir ini, dalam analisisnya akan digunakan spektrum gelombang JONSWAP. JONSWAP merupakan proyek yang dilakukan pada perairan *North Sea*.

Menurut DNV RP-C205 (2010), formulasi spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spektrum *Pierson-Moskowitz*. Spektrum JONSWAP mendeskripsikan angin yang membangkitkan gelombang dengan kondisi *sea state* yang ekstrim.

Kriteria yang ada di DNV RP-C205, bahwa spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan untuk perairan dengan :

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5 \dots\dots(2.21)$$

Hal ini didukung dengan pernyataan yang ada pada buku Chakrabarti (1987) bahwa pada kondisi *survival* di perairan Teluk Meksiko, yang tepat adalah penggunaan spektrum JONSWAP.

Tabel 2.2 Spektrum gelombang untuk beberapa daerah (Chakrabarti, 1987)

Location	Operational	Survival
Gulf of Mexico	P-M	JONSWAP
North Sea	JONSWAP	JONSWAP
Northen North Sea	JONSWAP	JONSWAP
Offshore Brazil	P-M	P-M
Western Australia	P-M	P-M
Offshore Newfoundland	P-M	P-M
West Africa	P-M	P-M

Berikut adalah persamaan spektrum JONSWAP (DNV RP-C205, 2010) :

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \dots\dots\dots(2.22)$$

dengan :

A_γ = *normalizing factor* = $1 - 0.287 \ln(\gamma)$

γ = *peakedness parameter*

(DNV OS E301) Untuk Teluk Meksiko, $\gamma = 2$ for $H_s > 6.5$

$$\gamma = 1 \text{ for } H_s \leq 6.5$$

σ = *spectral width parameter*

$$= 0,07 \text{ jika } \omega \leq \omega_p$$

$$= 0,09 \text{ jika } \omega > \omega_p$$

ω_p = *angular spectral peak frequency* (rad/s)

$$= 2\pi / T_p$$

ω = *wave frequency* (rad/s)

$S_{PM}(\omega)$ = spektrum *Pierson-Moskowitz*, dengan persamaan :

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^{-5} \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^4 \right) \dots\dots(2.23)$$

dengan :

H_s = tinggi gelombang signifikan (m)

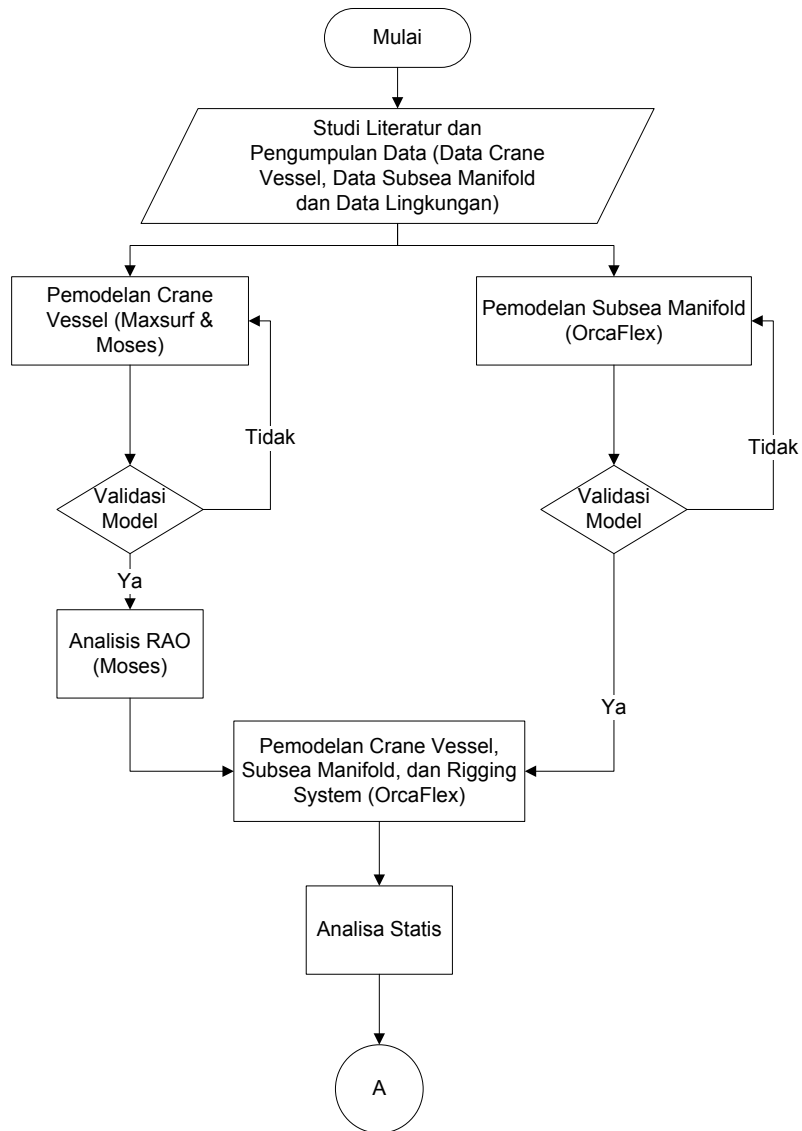
T_p = periode puncak (s)

BAB III

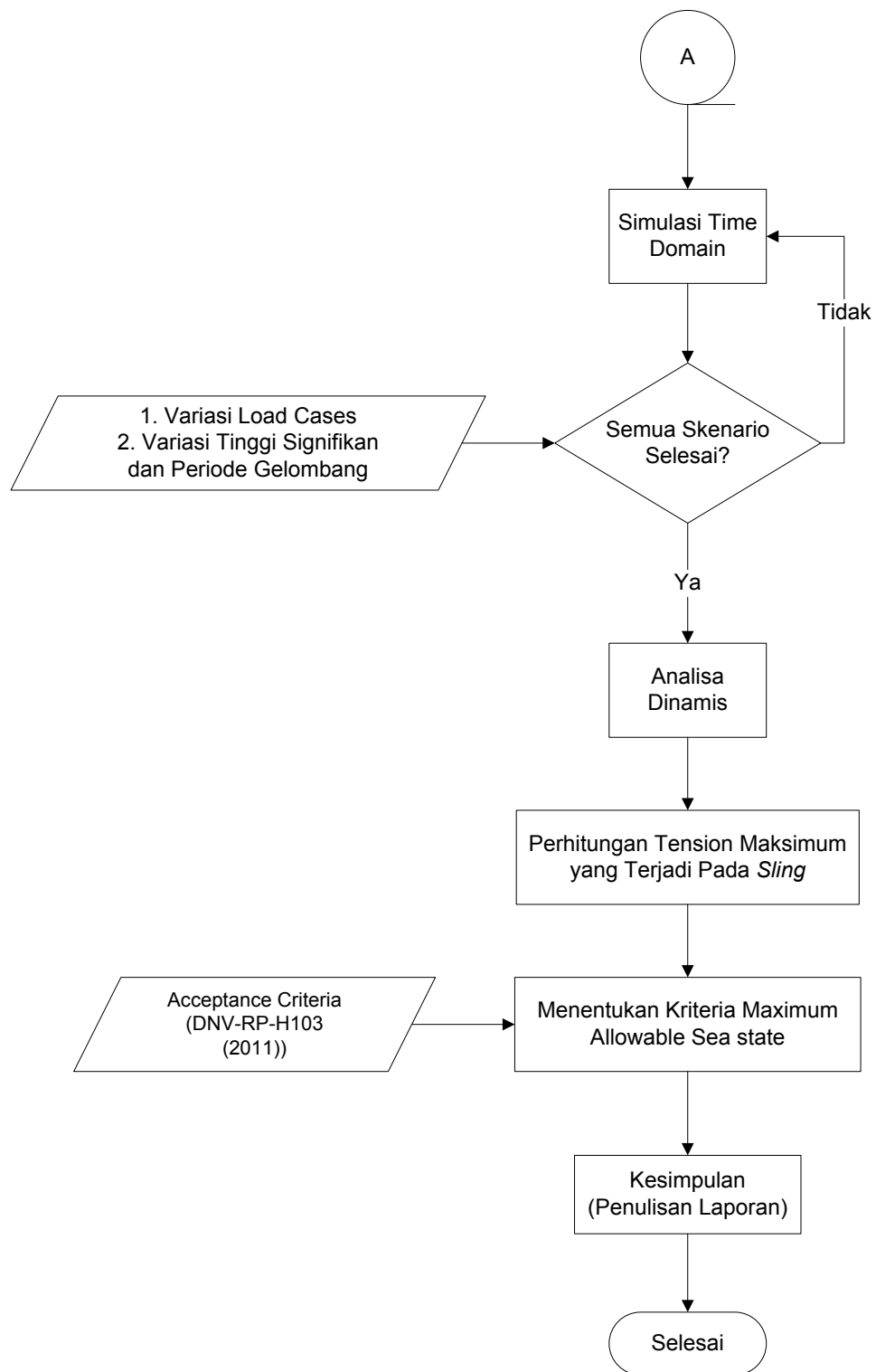
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Prosedur penelitian dalam tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan tahapan sebagaimana ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3.1 - Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.2 – Diagram Alir Metodologi Penelitian (Lanjutan)

Proses pengerjaan tugas akhir ini akan dimulai dengan melakukan kajian pustaka dan studi literatur terkait dengan permasalahan yang diangkat di dalam tugas akhir ini. Kemudian dilakukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan untuk melaksanakan penelitian, yaitu data *crane vessel*, data struktur *subsea manifold* beserta *rigging arrangement*-nya, dan data lingkungan tempat struktur *subsea manifold* diturunkan.

Kapal yang dimodelkan dalam tugas akhir ini adalah kapal DCV *Aegir*, milik Hereema Marine Contractors. Kapal ini memiliki displasmen operasi sebesar 78489 Ton pada sarat 10.5 m (sarat operasi). *Subsea manifold* yang akan diturunkan ke dalam laut adalah berupa *dual header subsea manifold* dengan dimensi *main frame* sebesar 13 m x 7.4 m x 4.2 m dengan berat sebesar 251 MT.

Setelah semua data terkumpul, selanjutnya dilakukan analisis dengan menggunakan perangkat lunak. *Crane vessel* *Aegir* akan dimodelkan menggunakan *software* Maxsurf, kemudian karakteristik gerak dan hidrodinamisnya dianalisis menggunakan *software* MOSES. *Output* yang dihasilkan dari analisis menggunakan MOSES adalah berupa RAO, *added mass* dan *damping*, serta *wave drift* yang mana kemudian dipakai sebagai input data kapal yang dipakai dalam simulasi di *software* OrcaFlex.

Untuk mendapatkan beban-beban dinamis yang bekerja pada struktur *subsea manifold* ketika diturunkan, dilakukan simulasi non-linier *time domain* menggunakan *software* OrcaFlex. Untuk melakukan simulasi *time domain* di OrcaFlex, *crane vessel*, *rigging system* dan struktur *subsea manifold* yang akan diturunkan dimodelkan terlebih dahulu. Data karakteristik gerak dan hidrostatis *crane vessel* yang didapatkan melalui *software* MOSES pun dimasukkan ke OrcaFlex, begitu juga karakteristik *subsea manifold* yang akan diturunkan, data yang dimasukkan berupa dimensi, massa, inersia, koefisien drag, koefisien massa tambah dan lain-lain.

Setelah pemodelan di OrcaFlex selesai, dilakukan simulasi *time domain* untuk tiap *load-cases* dengan lama waktu minimal 30 menit, namun dalam tugas akhir ini

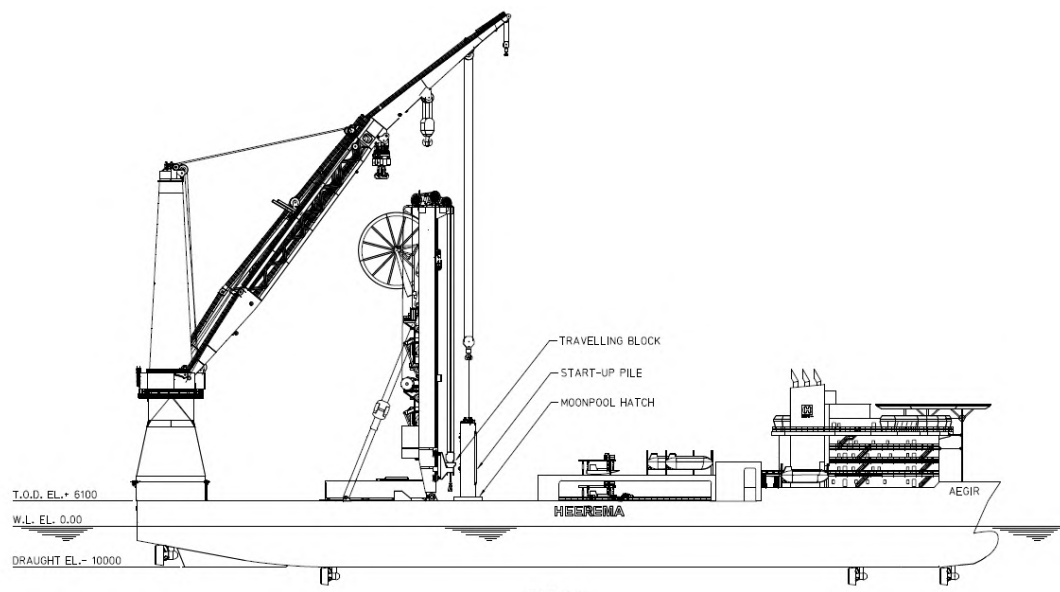
analisis *time domain* dilakukan dengan lama waktu selama 3 jam sesuai rekomendasi DNV. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui besar respon gerakan struktur dan harga *tension sling* yang terjadi selama operasi penurunan untuk setiap *load-case*-nya. Berdasarkan hasil analisis tersebut selanjutnya ditentukan sebuah batasan *maximum allowable sea-state*, yaitu sebuah *sea-state* yang membatasi boleh atau tidaknya operasi dijalankan. Penentuan kriteria *maximum allowable sea-state* mengacu kepada *acceptance criteria* dari DNV-RP-H103 (2011) *Section 4.4*, yaitu *slack sling criterion* dan *capacity check criterion*.

3.2 Pengumpulan Data

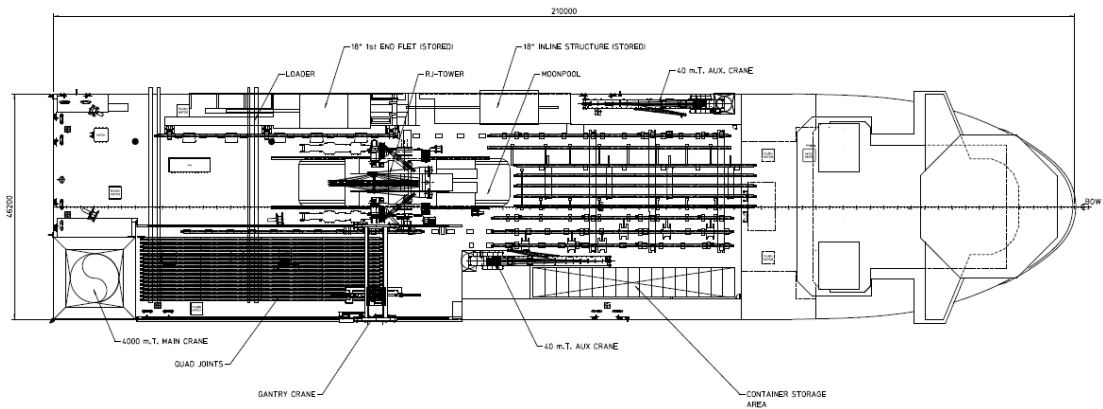
Data *crane vessel*, *subsea manifold* dan data lingkungan yang akan dipakai dalam analisis pada tugas akhir ini akan dijelaskan dalam sub-bab berikutnya.

3.2.1 Data Crane Vessel

Crane vessel yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah DCV *Aegir*, milik Hereema Marine Contractors (HMC). Gambar 3.3 dan 3.4 menunjukkan *general arrangement* DCV *Aegir*.



Gambar 3.3 *General Arrangement* DCV *Aegir*
(Sumber: Hereema Marine Contractors)



Gambar 3.4 *General Arrangement DCV Aegir* (lanjutan)
(Sumber: Hereema Marine Contractors)

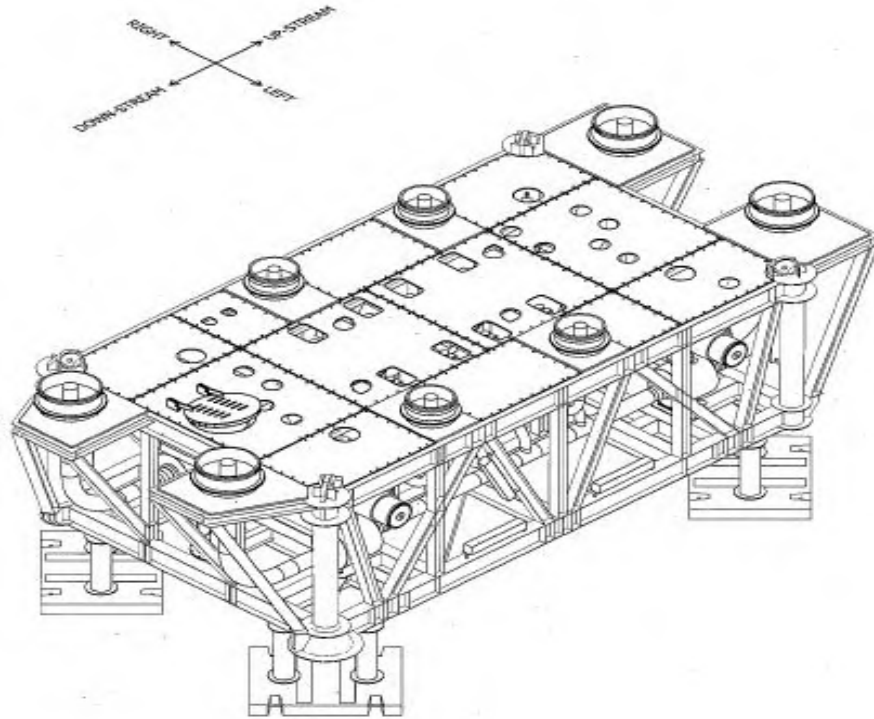
DCV *Aegir* memiliki panjang 210 m, lebar 46.2 m, dan tinggi 16.1 m, dengan displacement pada kondisi operasi sebesar 78489 Ton. Tabel 3.1 memberikan data hidrostatik DCV *Aegir* pada kondisi operasi.

Table 3.1 Data spesifikasi crane vessel Aegir

Deskripsi	Lambang	Nilai	Satuan
Panjang Keseluruhan	LOA	211.48	m
Length per perpendicular	LPP	197.6	m
Lebar	B	46.2	m
Tinggi	H	16.1	m
Sarat Operasi	T	10.5	m
Displasmen Operasi	Δ	78489	Ton
Volume Displasmen	Vdispl	76575	m ³
Luas Bidang Garis Air	WPA	8162	m ²
<i>Posisi Titik Berat (COG) dengan posisi crane up</i>			
Dari stern	LCG	97.1	m
Dari positif portside	TCG	-0.2	m
Dari lunas	VCG	13.4	m
<i>Tinggi Metacentra</i>			
GMT		9.6	m
GLT		310.5	m

3.2.2 Subsea Manifold

Subsea manifold merupakan kumpulan pipa-pipa dan valves yang dipakai untuk mengontrol dan memonitor aliran dalam saluran produksi. Tampak isometri *subsea manifold* yang akan diturunkan ditunjukkan oleh Gambar 3.4 dan data dimensi serta berat struktur dirangkum di dalam Tabel 3.1.



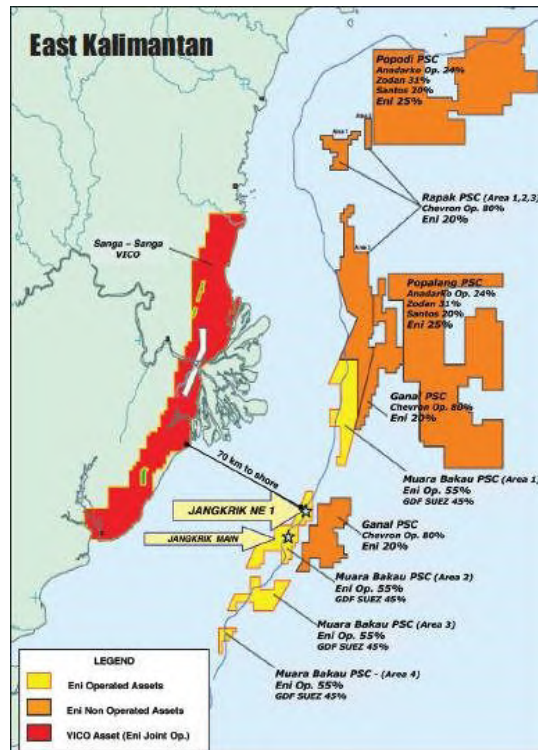
Gambar 3.5 Tampak isometri struktur *subsea manifold*

Table 3.2 Data berat dan dimensi subsea manifold

Dual Header Manifold			
Weight	251 MT		
Dimension	Width	Length	Height
Bottom Frame	7.4 m	13 m	4.2 m
Top Frame	7.4 m	17.35 m	

3.2.3 Data Lingkungan

Subsea manifold akan diinstal di Lapangan Jangkrik, Lepas Pantai Kalimantan Timur, yang mana ditunjukkan oleh Gambar 3.5, sedangkan Tabel 3.2 menyajikan data parameter gelombang yang dipakai sebagai input untuk membangkitkan gelombang acak di *software* OrcaFlex.



Gambar 3.6 Lokasi *Field* Jangkrik

(Sumber: <http://www.2b1stconsulting.com/eni-and-gdf-suez-call-for-tender-on-2-billion-jangkrik/>)

Table 3.3 Data lingkungan yang dipertimbangkan di dalam analisis

Deskripsi	Lambang	Nilai	Satuan	Referensi
Tinggi Gelombang Signifikan	Hs	1.8 – 3.8 (interval 0.5)	<i>meter</i>	Meta Ocean Data – Jangkrik Field
Zero Up Crossing Period	Tz	4.5 – 6.7	<i>sekon</i>	Meta Ocean Data – Jangkrik Field
Arah datang gelombang	β	0, 45, 90, 130, 180	<i>derajat</i>	DNV-RP-H103 (2011) Section 4.3.3.6
Peak shape parameter	γ	2.5	-	Djarmiko. E. B. (2012)

BAB IV

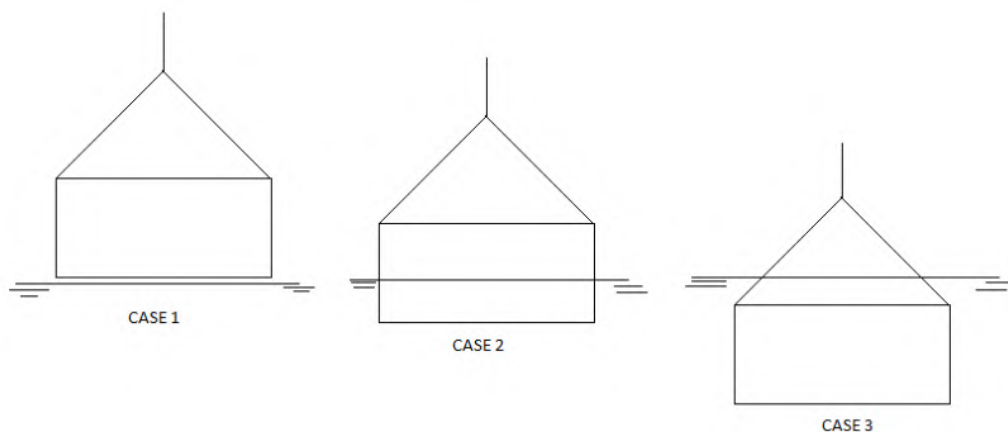
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Skenario Operasi Penurunan

Dalam operasi penurunan *subsea manifold* ke dalam laut, *subsea manifold* akan menerima beban hidrodinamis yang berbeda-beda untuk setiap fase penurunannya, maka dari itu perlu ditetapkan skenario yang akan dianalisis untuk mencari tahu batasaan kritikal di mana operasi masih dapat dijalankan, berikut adalah skenario operasi penurunan *subsea manifold* yang akan dianalisis di dalam tugas akhir ini.

4.1.1 Load Cases

Berdasarkan DNV RP H-103 *Section 4.5* tentang *typical load cases*, maka ditentukan 3 skenario *load cases* yang akan dianalisis di dalam operasi penurunan ini, *Load Case 1* adalah ketika *subsea manifold* tepat berada di atas permukaan air laut, *Load Case 2* adalah ketika *subsea manifold* sebagian berada di dalam laut, dan *Load Case 3* adalah ketika *subsea manifold* tepat berada di bawah permukaan air laut. Pembagian ini dilakukan mengingat beban-beban hidrodinamis yang bekerja untuk tiap *load cases* berbeda antara satu dengan yang lain.



Gambar 4.1 *Load cases* yang akan dianalisis

Pada *Load Case 1*, struktur *subsea manifold* tepat berada di atas permukaan air laut di mana beban hidrodinamis yang bekerja adalah berupa beban *slamming* pada bagian bawah struktur yang terdiri atas *beam* dari *main frame* struktur. Pada *Load Case 2* struktur *subsea manifold* sebagian terbenam di dalam laut, dimana beban hidrodinamis yang bekerja adalah berupa beban *drag force*, *varying buoyancy force*, massa tambah dan inersia yang bervariasi tergantung seberapa luas daerah yang berada di bawah permukaan air laut. Sedangkan pada *Load Case 3*, struktur *subsea manifold* sepenuhnya terbenam di dalam laut, di mana beban hidrodinamis yang bekerja adalah berupa beban *drag force*, massa tambah dan inersia.

4.1.2 Beban Lingkungan

Terdapat 5 variasi tinggi signifikan gelombang dari propagasi gelombang acak yang nilainya adalah antara 1.8 m sampai dengan 3.8 meter dengan interval 0.5 meter. Nilai tinggi signifikan gelombang diambil sesuai dengan data gelombang 100-tahunan *Field Jangkrik*.

Tabel 4.1 berisi ringkasan parameter-parameter gelombang yang diperlukan untuk mendefinisikan sebuah model gelombang acak di dalam *software* OrcaFlex. Gelombang acak dibangkitkan dengan menggunakan formulasi spektra JONSWAP di mana nilai H_s , T_z , dan *spectral parameters* yang lain dimasukkan untuk merepresentasikan gelombang di laut.

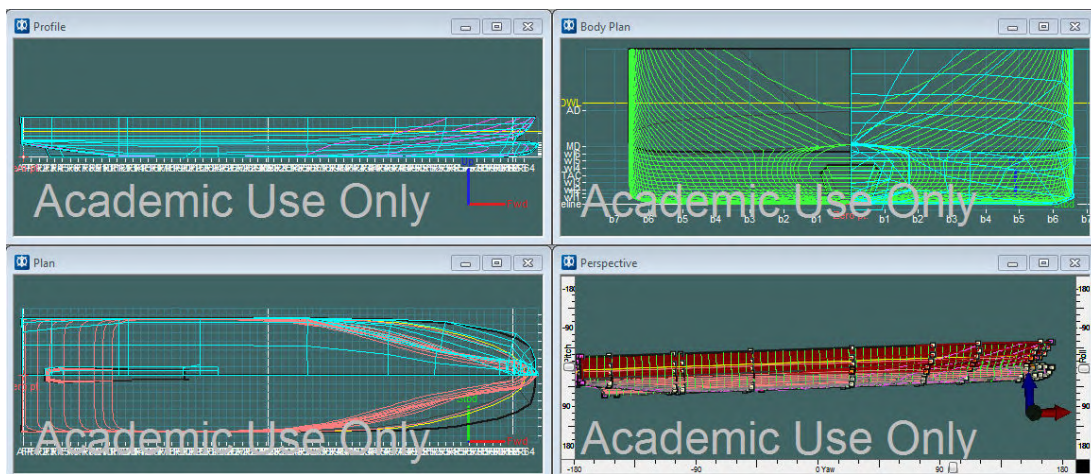
Tabel 4.1 Ringkasan parameter gelombang

Deskripsi	Lambang	Nilai	Satuan	Referensi
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	1.8 m, 2.8 m, 3.8 m	<i>meter</i>	Data metaocean Field Jangkrik
Zero Up Crossing Period	T_z	4.5 – 6.7	<i>sekon</i>	Data metaocean Field Jangkrik
Arah datang gelombang	β	0, 45, 90, 130, 180	<i>derajat</i>	DNV-RP-H103 (2011) Section 4.3.3.6
Peak shape parameter	γ	2.5	-	Djatkiko. E. B. (2012)

4.2 Pemodelan *Crane Vessel*

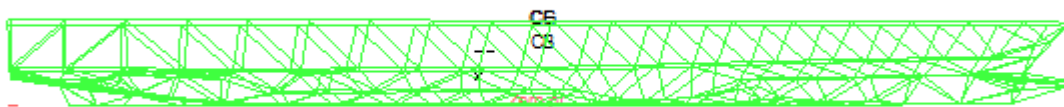
Pemodelan lambung *crane vessel* bertujuan untuk mengetahui karakteristik gerak kapal yang akan dipakai dalam operasi penurunan, sebab gerakan struktur *subsea manifold* saat diturunkan ke dalam laut turut dipengaruhi oleh gerakan kapal akibat ekstiasi gelombang.

Lambung DCV *Aegir* dimodelkan dengan menggunakan *software* Maxsurf seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.2. Pemodelan lambung kapal mengacu kepada gambar *general arrangement* dan data *principal dimension* kapal.



Gambar 4.2 Pemodelan lambung *crane vessel* dengan *software* Maxsurf

Setelah selesai dimodelkan di Maxsurf, model *crane vessel* selanjutnya diekspor ke *software* MOSES seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 untuk keperluan analisis karakteristik gerakan dan hidrostatis kapal.



Gambar 4.3 Meshing model lambung *crane vessel Aegir* pada *software* MOSES

Namun sebelum analisis RAO dapat dilakukan, harus dilakukan validasi data hidrostatik model. Validasi dilakukan dengan mengacu pada rekomendasi yang diberikan oleh International Association of Classification Society (IACS) tentang toleransi yang diperbolehkan antara data hidrostatik kapal dan data hidrostatik model. Tabel 4.2 memberi ringkasan parameter dan perhitungan validasi berdasarkan rekomendasi IACS.

Table 4.2 Validasi model lambung *crane vessel*

Parameter	Data Hidrostatik			Validasi	
	Available Data	Maxsurf	MOSES	Toleransi	Koreksi
Displacement (T Operasi, m)	78489	78407	78407	2%	0.1%
Draughts (m)	10.5	10.5	10.5	1%	0.0%
vertical center of gravity (m)	13.4	13.5	13.5	1%	-0.7%
LCB (from AP)	-	91.248	-91.2	1%	0.00%
KB (m)	-	5.681	5.7	1%	0.00%
GMt (m)	-	10.239	10.2	1%	0.38%
Transverse metacentric height (m)	-	23.739	23.7	1%	0.00%
Longitudinal metacentric height (m)	-	350.255	350.28	1%	-0.01%

4.3 Karakteristik Gerak Kapal di Gelombang Regular

Setelah model lambung *crane vessel* divalidasi, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis karakteristik gerakan kapal di gelombang regular. Analisis dikerjakan dengan bantuan *software* MOSES, teori yang digunakan untuk mendapatkan RAO pada kondisi *free floating* ($f_n = 0$) dari model *crane vessel* adalah teori 3D *diffraction*.

Pada kondisi mengapung bebas, karakteristik gerak kapal menghasilkan moda gerak vertikal yang lebih dominan jika dibandingkan dengan moda gerak horizontal. Ini dikarenakan moda gerak vertikal yang memiliki faktor kekakuan akibat eksitasi

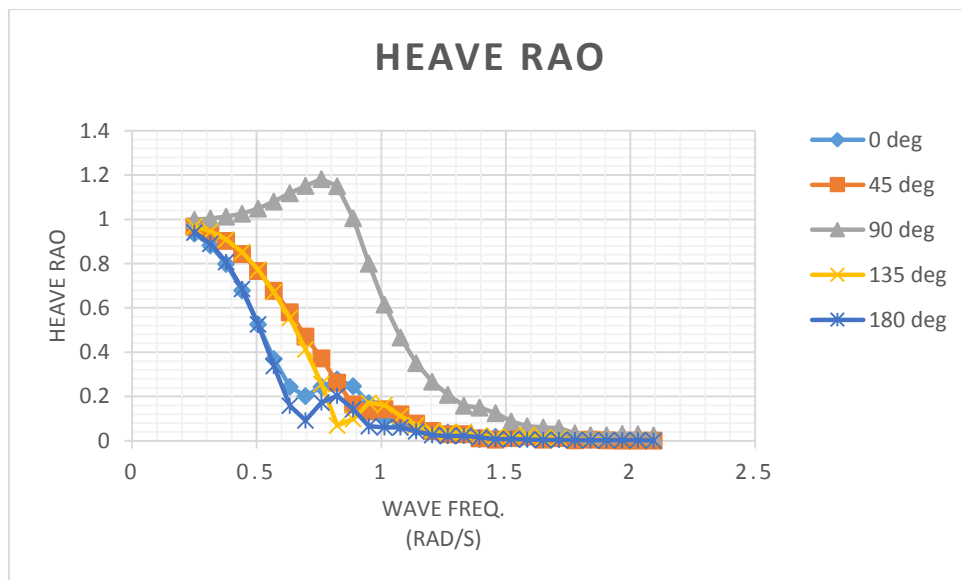
gelombang harmonik. Faktor kekakuan itu kemudian menyebabkan harga faktor redaman menjadi kecil sehingga terjadi lonjakan pada perubahan karakteristik gerak.

Sedangkan untuk moda gerak horizontal, tidak terdapat faktor kekakuan pada kondisi *free floating* sehingga memiliki nilai faktor redaman yang besar, akibatnya tidak ada lonjakan signifikan dalam perubahan karakteristik dalam moda ini. Bila terjadi kenaikan pada kurva, dapat diasumsikan bahwa gerakan tersebut dipengaruhi oleh efek kopel gerakan lainnya.

Selanjutnya akan dijelaskan karakteristik gerakan kapal untuk gerak moda vertikal dan moda gerak horizontal dengan variasi arah pembebanan gelombang 0° (gelombang buritan), 45° (gelombang perempat buritan), 90° (gelombang sisi), 135° (gelombang perempat haluan), dan 180° (gelombang haluan).

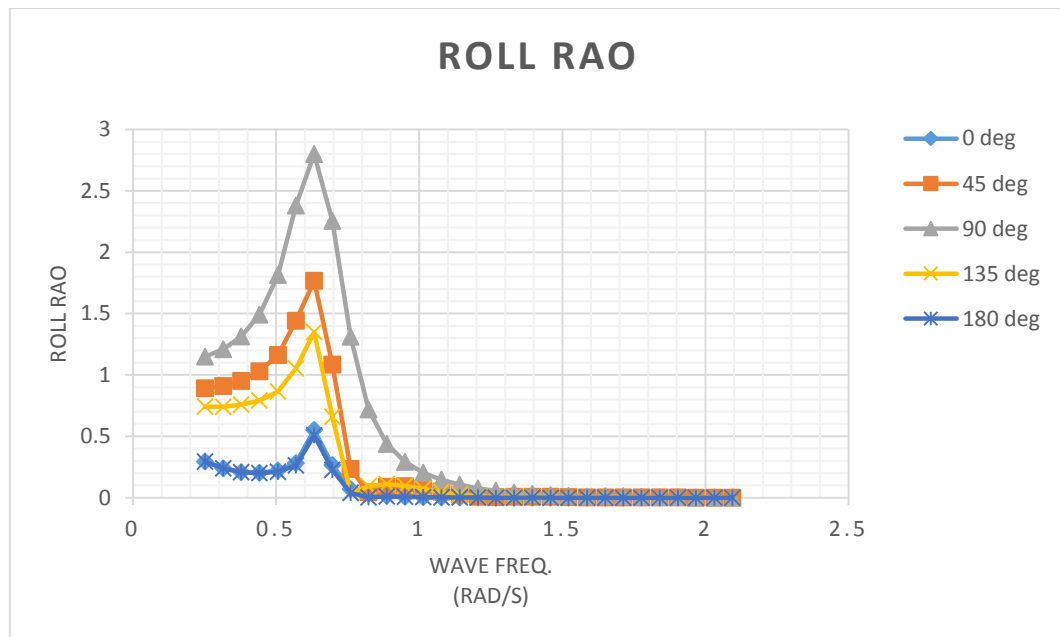
4.3.1 Karakteristik Gerak Kapal Moda Vertikal

Pada frekuensi rendah RAO *Heave* mempunyai harga yang hampir sama yaitu 1 m/m untuk semua arah pembebanan gelombang. Intensitas gerakan *heave* tertinggi terjadi pada saat datang gelombang dari arah 90° , yaitu sebesar 1.181 m/m pada frekuensi 0.76 rad/s.



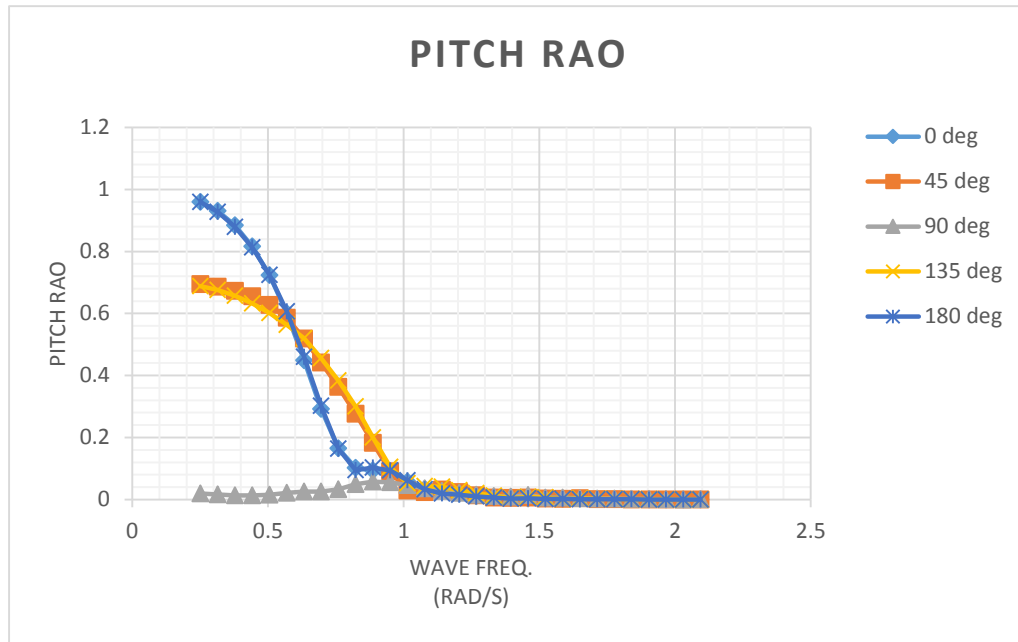
Gambar 4.4 RAO gerakan *heave* untuk kapal kondisi *free floating*

Untuk RAO gerakan *roll*, intensitas gerakan *roll* paling besar disebabkan oleh gelombang sisi (*heading* 90°), yaitu sebesar 2.8 deg/m pada frekuensi 0.63 rad/s. Disusul oleh gelombang dari *heading* 45° dan 135° yaitu sebesar 1.77 deg/m dan 1.35 deg/m pada frekuensi 0.633. Gelombang haluan dan buritan tidak begitu memberikan efek yang besar pada gerakan *roll*.



Gambar 4.5 RAO gerakan *roll* untuk kapal kondisi *free floating*

Pada RAO gerakan *pitch*, semua gerakan memiliki harga yang kecil yaitu di bawah 1 deg/m. Gerakan *pitch* maksimum terjadi pada saat terkena beban gelombang buritan, yaitu sebesar 0.96 deg/m yang terjadi pada frekuensi 0.251 rad/s. Kemudian harga RAO *Pitch* terbesar disusul oleh gelombang dari *heading* 135° dan 45° yaitu sebesar 0.69 m/s pada frekuensi 0.251 rad/s. Sedangkan gelombang sisi hampir tidak mempengaruhi RAO gerakan *Pitch* sama sekali.

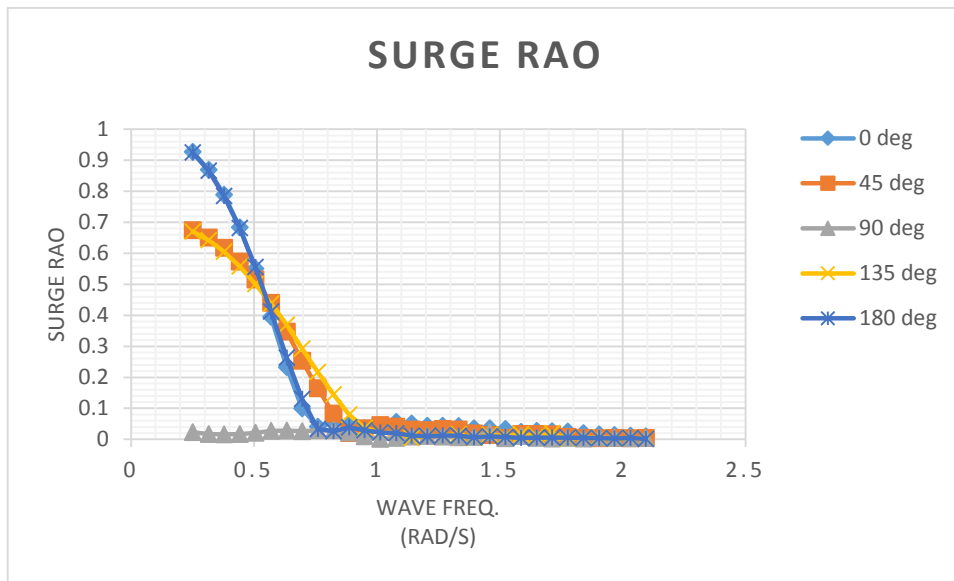


Gambar 4.6 RAO gerakan *pitch* untuk kapal kondisi *free floating*

4.3.2 Karakteristik Gerak Kapal Moda Horizontal

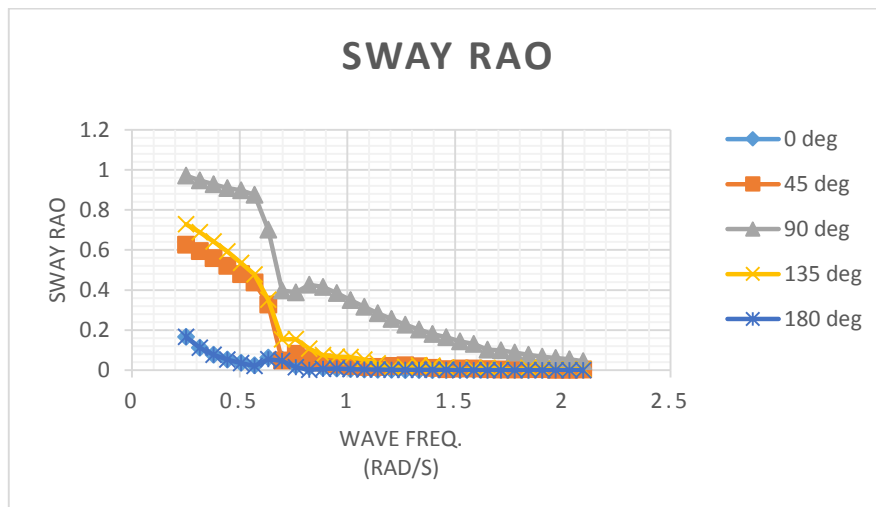
Seperti yang sudah dijelaskan di awal tadi, bahwa gerakan moda vertikal memiliki harga yang lebih besar dikarenakan adanya nilai faktor kekakuan. Sedangkan untuk moda gerakan horizontal, faktor kekakuan tidak ada dan nilai faktor redaman tinggi, sehingga tidak terjadi gerakan-gerakan yang signifikan.

Dapat dilihat pada Gambar 4.7, nilai RAO gerakan *Surge* yang paling besar adalah diakibatkan oleh gelombang buritan dan haluan, yaitu sebesar 0.93 m/m pada frekuensi 0.25 rad/s, dan kemudian disusul oleh gelombang perempat buritan dan haluan sebesar 0.67 m/m pada frekuensi 0.25 rad/s. Gelombang sisi memberikan efek yang tidak signifikan pada RAO gerakan *Surge*.



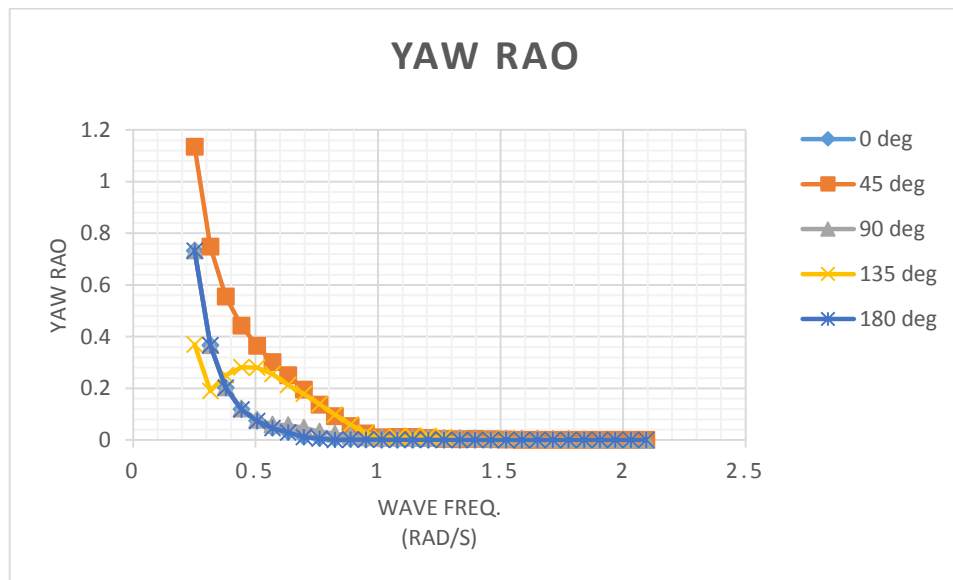
Gambar 4.7 RAO gerakan *surge* untuk kapal kondisi *free floating*

Selanjutnya, dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa RAO gerakan *Sway* intensitas paling besar terjadi akibat gelombang sisi, yaitu sebesar 0.97 m/m pada frekuensi 0.25 rad/s. Kemudian disusul oleh RAO gerakan *sway* akibat gelombang seperempat haluan dan buritan, yang secara berturut-turut nilainya sebesar 0.73 m/m dan 0.63 m/s pada frekuensi 0.25 rad/s. Gelombang haluan dan buritan tidak memberikan efek signifikan terhadap gerakan *sway* kapal.



Gambar 4.8 RAO gerakan *sway* untuk kapal kondisi *free floating*

Gerakan *yaw* maksimum yang dapat dilihat dari Gambar 4.9 terjadi akibat gelombang perempat buritan, yaitu sebesar 1.1 deg/m pada frekuensi 0.25 rad/s. Tingginya gerakan *yaw* pada arah pembebanan ini jika dibandingkan dari arah pembebanan lain diduga akibat bentuk lambung kapal sendiri. RAO *yaw* untuk gelombang haluan, buritan, dan sisi memiliki nilai yang sama, yaitu nilai maksimum terjadi pada frekuensi rendah 0.25 rad/s dan terus menurun dan menjadi 0 deg/m pada frekuensi 1.014 rad/s.



Gambar 4.9 RAO gerakan *yaw* untuk kapal kondisi *free floating*

Rangkuman nilai maksimum RAO untuk setiap moda gerakan pada tiap arah propagasi gelombang diberikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Ringkasan nilai RAO maksimum untuk tiap moda gerak

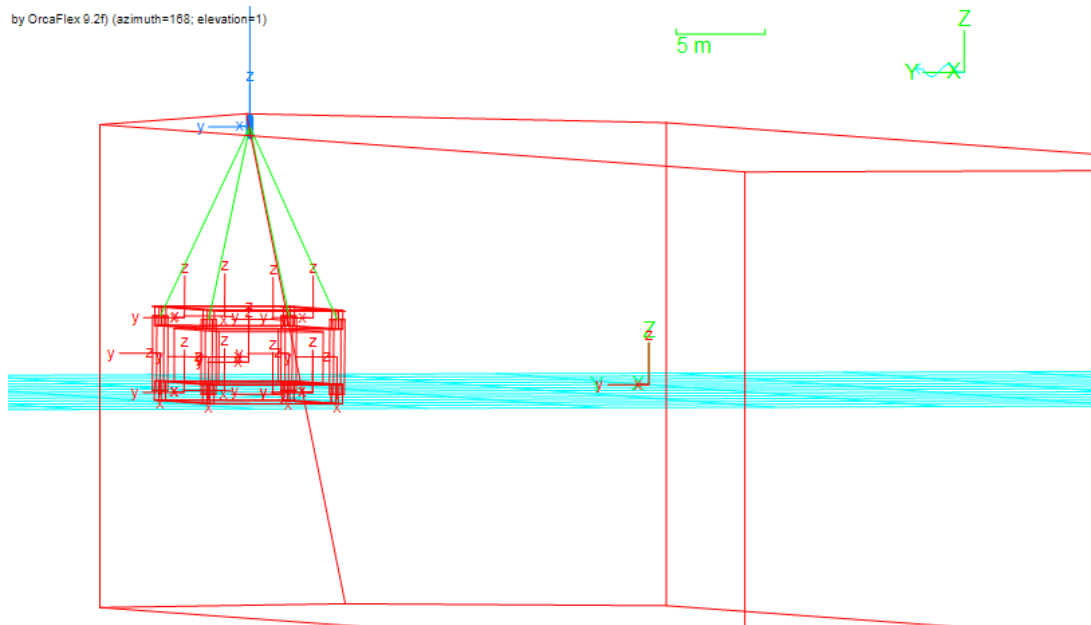
Moda Gerakan	Satuan	RAO Maksimum					Nilai Maksimum
		0 deg	45 deg	90 deg	135 deg	180 deg	
Heave	m/m	0.94	0.97	1.18	0.97	0.94	1.18
Roll	deg/m	0.55	1.77	2.80	1.35	0.51	2.80
Pitch	deg/m	0.96	0.69	0.06	0.69	0.96	0.96
Surge	m/m	0.93	0.67	0.03	0.67	0.93	0.93
Sway	m/m	0.17	0.63	0.97	0.73	0.17	0.97
Yaw	deg/m	0.73	1.14	0.73	0.37	0.73	1.14

4.4 Pemodelan Struktur *Subsea Manifold* dan *Rigging System*

Pemodelan struktur *subsea manifold* dan *rigging system* di software OrcaFlex merupakan tahapan yang cukup sulit dan menyita waktu. Objek-objek yang dimodelkan di OrcaFlex adalah *crane vessel*, *subsea manifold* dan *rigging system* yang terdiri atas *crane*, *shackle* dan *sling* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10.

Karakteristik hidrodinamis kapal yang dipakai untuk menurunkan *subsea manifold* ke dalam laut diinputkan sesuai dengan karakteristik hidrodinamis *crane vessel* yang sudah dimodelkan di software Maxsurf dan dianalisis karakteristik gerakannya di MOSES.

Subsea manifold sebenarnya dapat dimodelkan dengan dua cara, yaitu *simple model* dan *detailed model* (Bjerkholt, R. F., 2014). *Simple model* terdiri hanya atas sebuah *lumped 6D buoy*, sedangkan *detailed model* terdiri atas beberapa *6D buoys* yang merepresentasikan *main frame*, *pipping*, dan *plate* dari struktur yang sebenarnya.



Gambar 4.10 Tampak *rigging system* pada model

Perbedaan karakteristik antara *simple model* dan *detailed model* adalah bagaimana model tersebut mensimulasikan *buoyancy* yang bekerja untuk tiap fase penurunan. Model yang hanya terdiri atas satu buah *lumped 6D Buoy* terkadang

memberikan hasil *buoyancy* yang tidak realistis, sedangkan *detailed model* mampu menghitung perubahan beban *buoyancy* saat memasuki air dengan lebih akurat. (Bjerkholt, Runa Folvik. 2014)

Crane dimodelkan sebagai *winch* di OrcaFlex. Berdasarkan hasil penelitian Sarkar dan Gudmestad (2010), untuk analisis dinamis penurunan melalui permukaan air laut (*splash zone lowering*), memodelkan kekakuan dari *crane* dan *wire* secara benar dan sesuai dengan karakteristik aslinya sangatlah penting untuk menghindari hasil yang tidak realistis. Normalnya kecepatan crane menurunkan subsea structure ke dalam laut adalah sebesar 0.5 m/s.

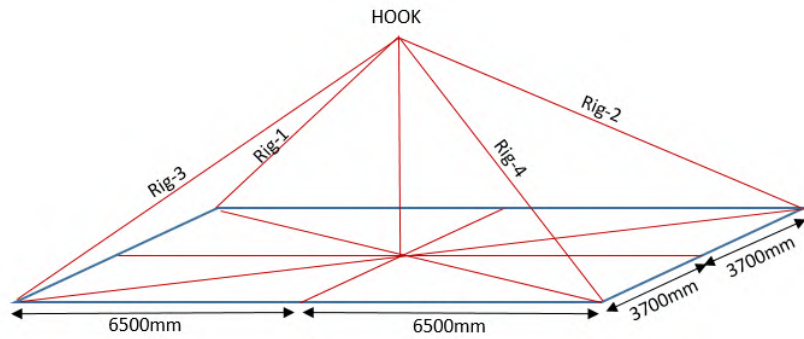
Tabel 4.2 memberikan rangkuman data karakteristik crane yang dipakai dalam simulasi operasi penurunan *subsea manifold*. Data ini penting untuk menghindari hasil yang tidak realistis.

Table 4.4 Ringkasan data karakteristik crane yang dipakai dalam operasi

Item	Magnitude	Unit
Number of crane wires	2x8	-
Diameter of wire	72	mm
Wire stiffness	280000	kN
Crane capacity	2000	mT
Mass crane block	201	mT

Shackle yang menghubungkan *winch/crane* dengan 4 buah *sling* dimodelkan sebagai *3D buoy*, sebab *3D buoy* memiliki tiga derajat kebebasan yaitu ke sumbu X, Y, dan Z sesuai dengan karakteristik *shackle* yang sebenarnya. *Sling* dimodelkan sebagai *link* berupa *tethers*, yaitu penghubung antar dua struktur yang dapat mengkalkulasi *tension*.

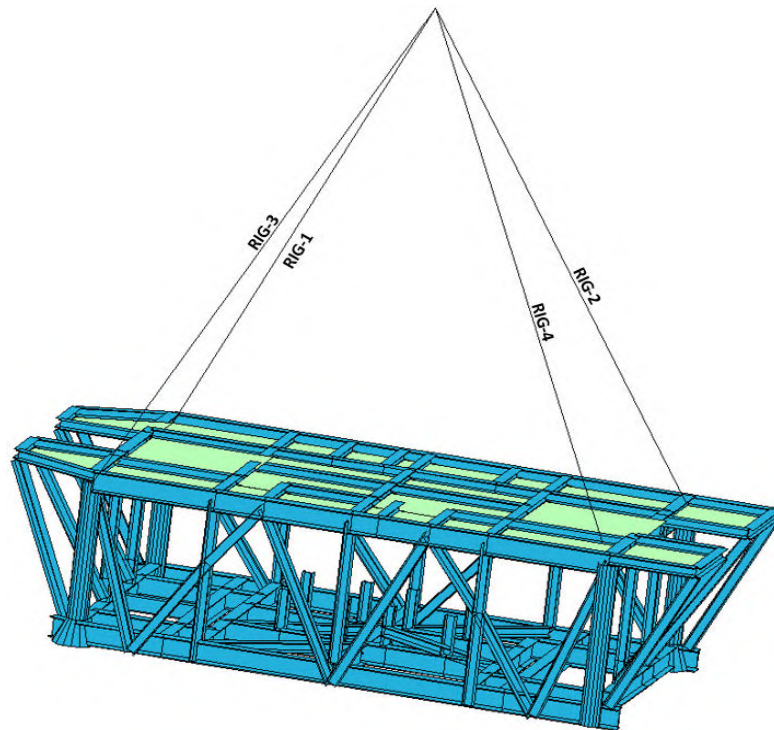
Konfigurasi *rigging* dalam operasi dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 serta properti dari tiap *sling* ditampilkan pada Tabel 4.5. *Sling* yang dipakai dalam operasi ini memiliki diameter 74 mm dengan MBL = 361 MT untuk tiap *sling*-nya.



Gambar 4.11 Konfigurasi rigging yang dipakai dalam operasi

Tabel 4.5 Rangkuman properti rigging yang dipakai dalam operasi

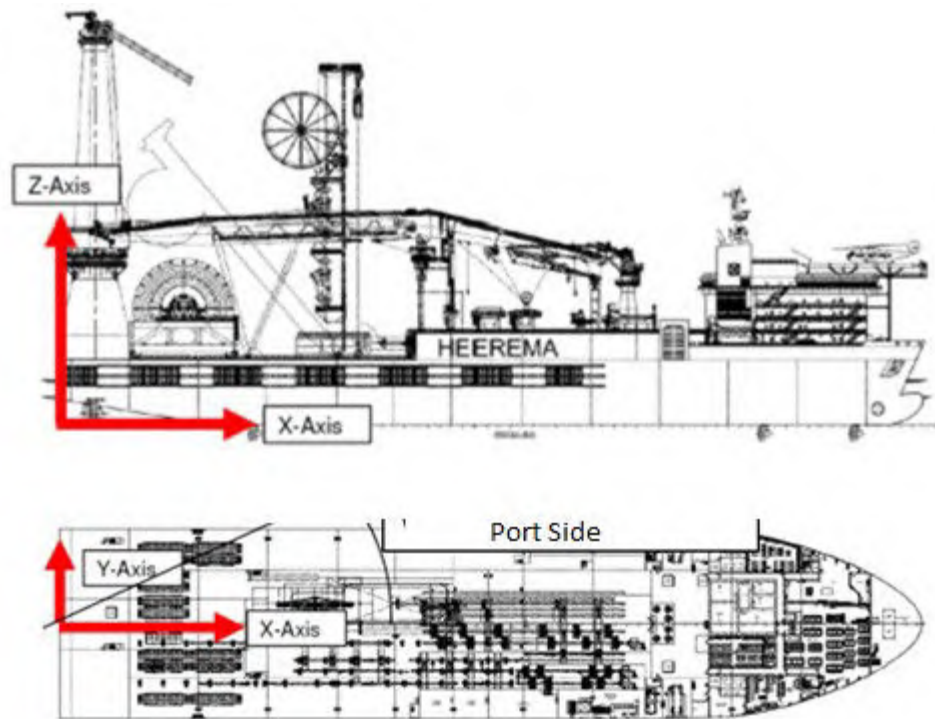
<i>all in mm</i>	Rig-1	Rig-3	Rig-2	Rig-4
Sling Diameter	74	74	74	74
Rigging Length	13135.3	13135.3	13135.3	13135.3
Rigging Height	10797.97	10797.97	10797.97	10797.97
Δ Rigging Height	0			
Angle (Deg.)	68	68	68	68



Gambar 4.12 Tampak model subsea manifold sedang diangkat

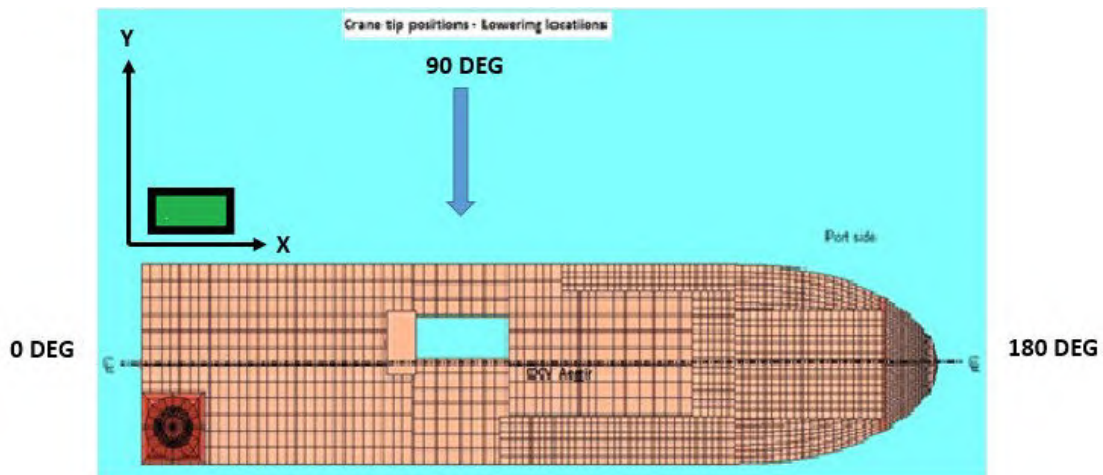
4.5 Respon Gerakan Struktur *Subsea Manifold*

Struktur subsea manifold yang diangkat lebih kecil dari 1-2 % displasmen kapal, sehingga dikategorikan dalam light lift, yang mana menurut DNV tidak mempengaruhi gerakan kapal. Telah dilakukan analisis *time domain* selama 3 jam untuk tiap skenario beban sesuai batasan masalah yang telah dibuat, namun untuk efisiensi penulisan, maka yang akan ditampilkan hanya untuk kondisi paling ekstrim saja, yaitu pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m dengan variasi arah datang gelombang $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$. Untuk memahami arah respons gerakan struktur maka sistem sumbu akan dijelaskan dalam Gambar 4.13 dan letak *subsea manifold* relatif terhadap kapal dijelaskan dalam Gambar 4.14



Gambar 4.13 Sumbu-sumbu di dalam sistem

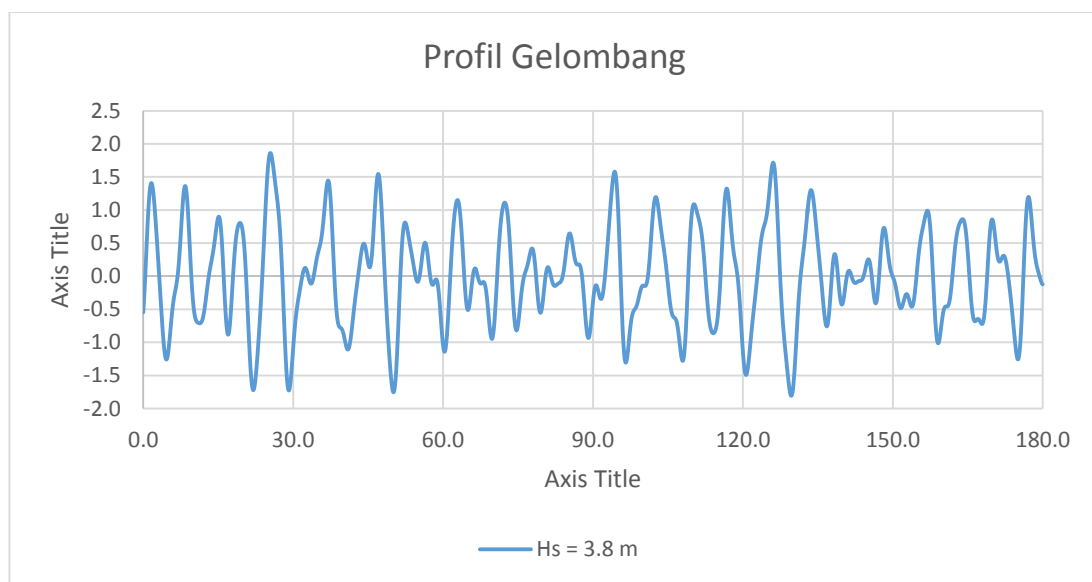
Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa *offset* signifikan paling besar terjadi pada *Load Case* 1, yaitu ketika struktur tepat berada di atas permukaan air laut, dengan arah datang gelombang 90° . Besar *offset* signifikan maksimum yang terjadi untuk masing-masing sumbu adalah: $X = 8.5$ m, $Y = 10.35$ m, dan $Z = 1.01$ m.



Gambar 4.14 Posisi subsea manifold terhadap kapal

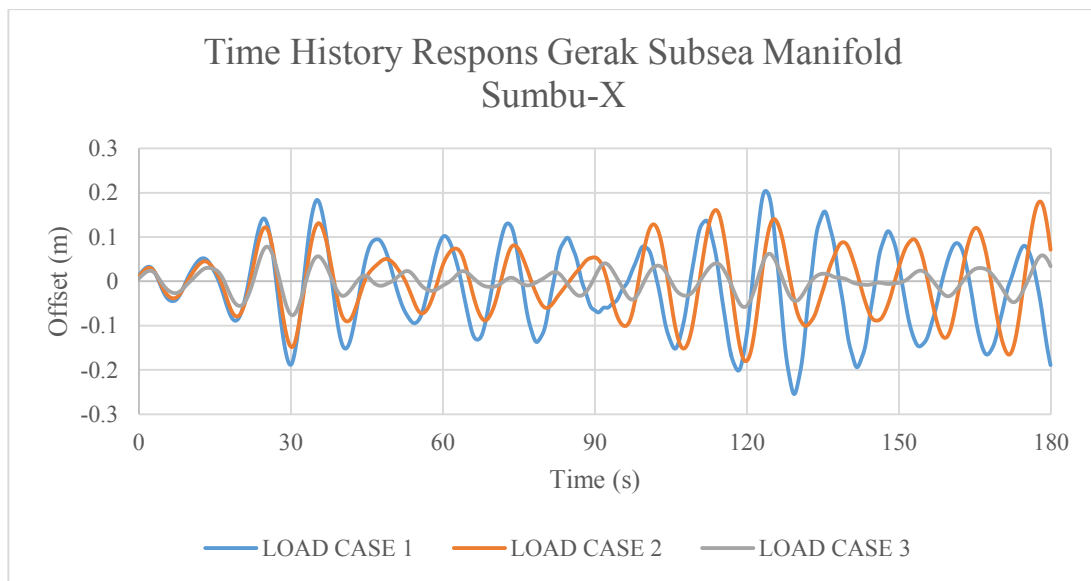
4.5.1 Perbandingan Respons Gerak Struktur Untuk Tiap Load Case

Telah dilakukan simulasi *time domain* selama 3 jam untuk tiap-tiap *load case*. *Time histories* selama 180 detik ditampilkan dengan tujuan untuk memperlihatkan perbedaan respons dinamis struktur *subsea manifold* pada tiap *load case*. Hasil analisis yang ditampilkan adalah untuk kondisi paling ekstrim yaitu ketika tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m dan $T_z = 6.7$ s dengan *heading* 90° . Profil gelombang yang dipakai dalam analisis dapat dilihat pada Gambar 4.15.



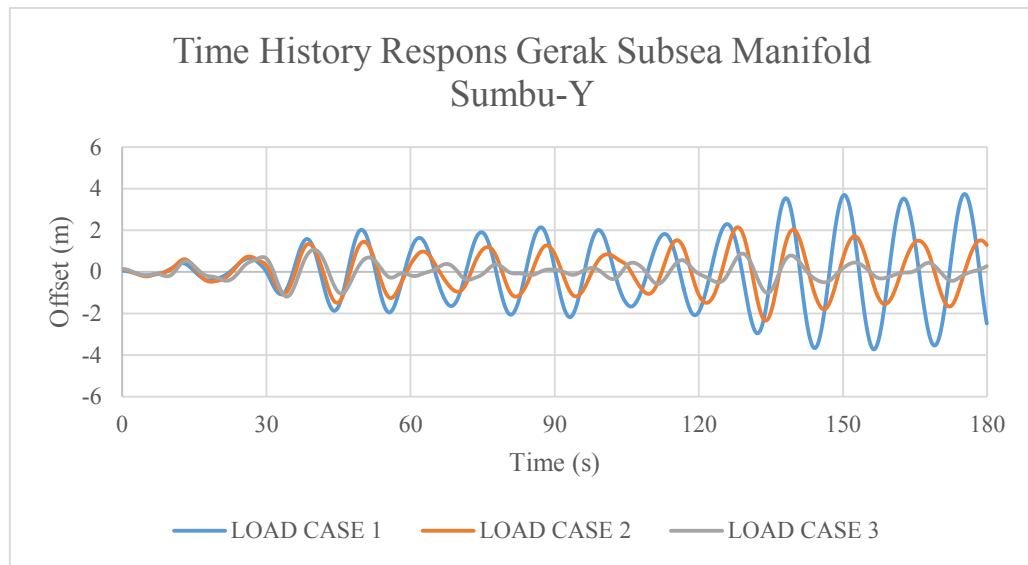
Gambar 4.15 Profil gelombang untuk $H_s = 3.8$ m dan $T_z = 6.7$ s

Time history respons gerak *subsea manifold* untuk sumbu-x ditampilkan pada Gambar 4.16. Respons gerak pada sumbu-X jika diumpamakan pada kapal adalah seperti gerakan surge. Dapat dilihat bahwa respons gerakan terbesar terjadi pada *Load Case 1*, kemudian disusul oleh *Load Case 2*, dan respons paling kecil adalah pada *Load Case 3*. Perbedaan respons ini tentu disebabkan oleh perbedaan beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur untuk tiap *load-case*-nya.



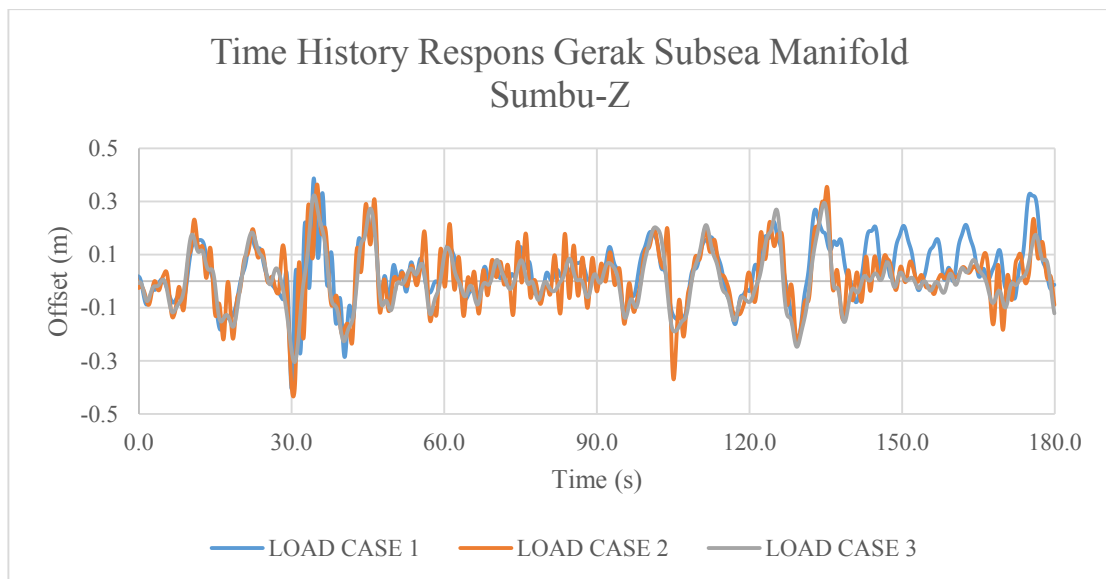
Gambar 4.16 *Time history* respons gerak translasi pada sumbu-X

Respons gerak *subsea manifold* pada sumbu-Y dapat dilihat pada Gambar 4.17. Respons gerak *subsea manifold* pada sumbu-Y jika diumpamakan seperti pada kapal adalah seperti gerakan *sway*. Dapat diamati bahwa respons gerak paling besar terjadi pada saat *Load Case 1*, dan yang paling kecil terjadi pada *Load Case 3*.



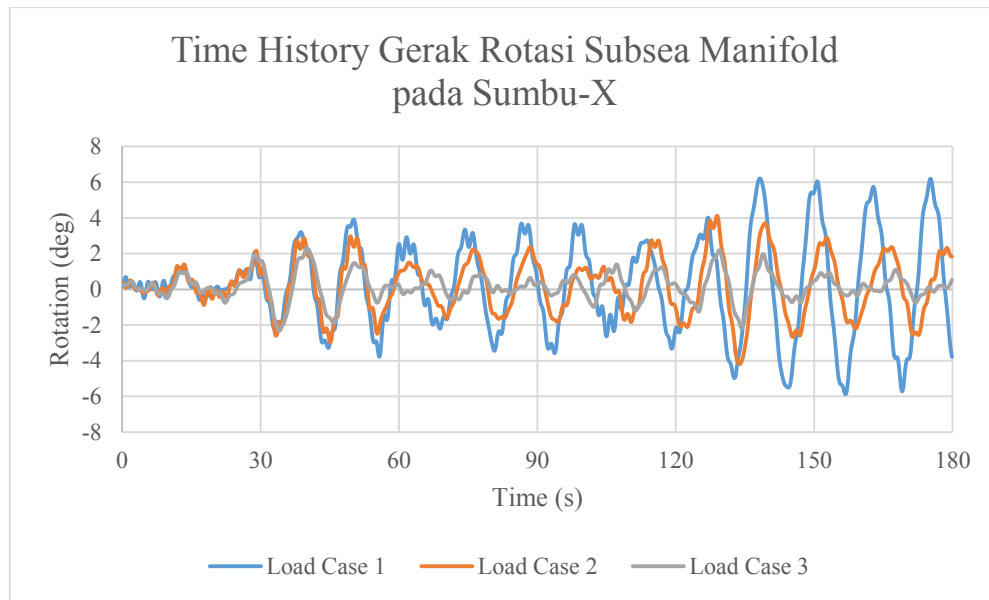
Gambar 4.17 *Time history* respons gerak translasi pada sumbu-Y

Respons gerak *subsea manifold* pada sumbu-Z dapat diamati pada gambar 4.18. Respons gerak *subsea manifold* pada sumbu-Z jika pada kapal dapat diumpamakan seperti gerakan *heave*, yaitu gerakan vertikal. Respons paling besar terjadi pada saat *Load Case 1*, dan respons paling kecil terjadi pada saat *Load Case 3*.



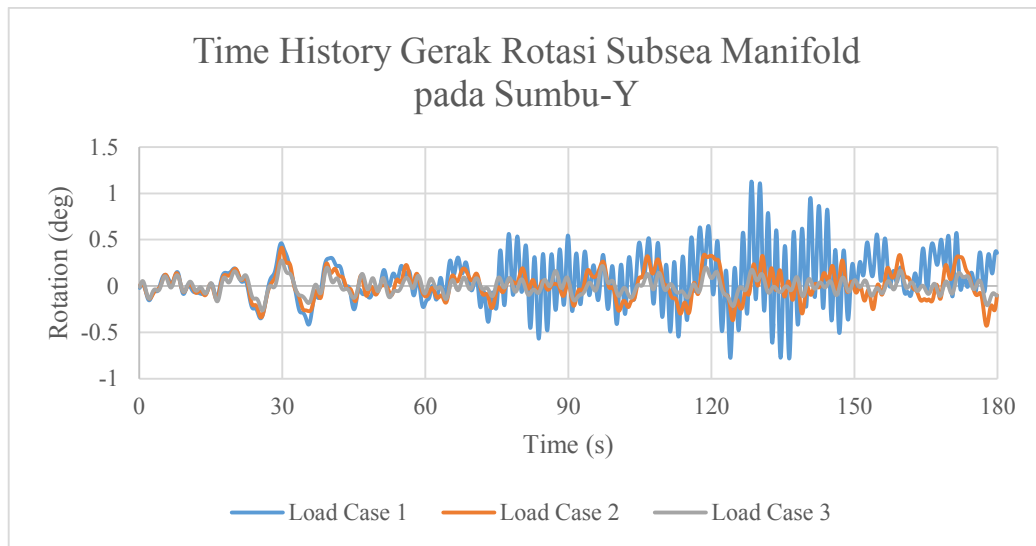
Gambar 4.18 *Time history* respons gerak translasi pada sumbu-Z

Subsea manifold juga mengalami gerak rotasi akibat eksitasi gelombang ketika sedang diturunkan ke dalam laut. Respons gerak rotasi paling besar pada sumbu-X terjadi ketika gelombang datang dari arah 90° . Pada gambar 4.19 Ditampilkan *time history* gerak rotasi struktur *subsea manifold* pada sumbu-X, yang jika diibaratkan pada kapal, gerakan ini merupakan gerakan *roll*. Respons gerak rotasi paling besar terjadi pada *Load Case 1* dan yang paling kecil terjadi pada *Load Case 3*.



Gambar 4.19 *Time histroy* respons gerak rotasi pada sumbu-X

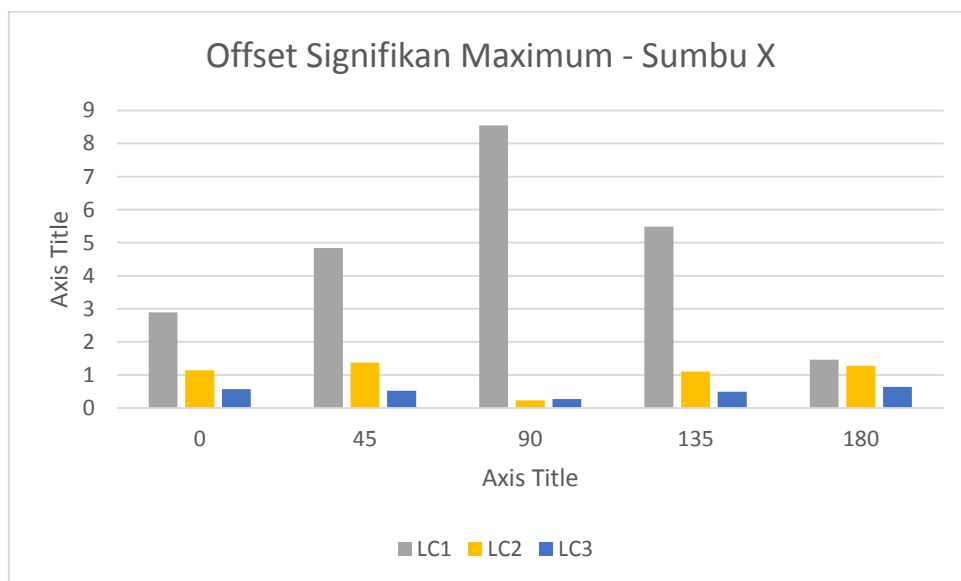
Pada Gambar 4.20 Ditampilkan *time history* gerak rotasi *subsea manifold* pada sumbu-Y yang diakibatkan oleh gelombang heading 90° dengan tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m. Jika struktur subsea manifold diumpamakan sebuah kapal, gerakan rotasi pada sumbu-Y adalah moda gerak *pitch*. Rotasi paling besar terjadi pada *Load Case 1*, dan rotasi paling kecil terjadi pada *Load Case 3*.



Gambar 4.20 *Time history* respons gerak rotasi pada sumbu-Y

4.5.2 Offset Signifikan Pada Sumbu X

Setelah dilakukan analisis *time domain* selama tiga jam, maka dilakukan analisis untuk mengetahui besar nilai *offset* signifikan struktur *subsea manifold* yang diturunkan. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.21 bahwa untuk semua arah datang gelombang, *offset* signifikan maksimum terjadi pada *Load Case 1*, dan *offset* signifikan minimum terjadi pada *Load Case 3*.



Gambar 4.21 Grafik offset signifikan pada sumbu X

Pada *Load Case* 1, offset signifikan maksimum terjadi ketika gelombang datang dari arah 90° dengan nilai sebesar 8.5 m, sedangkan pada *Load Case* 2 dan 3 terjadi *offset* signifikan minimum. Ringkasan nilai offset signifikan untuk tiap *load case* dan arah pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Offset signifikan pada sumbu-X

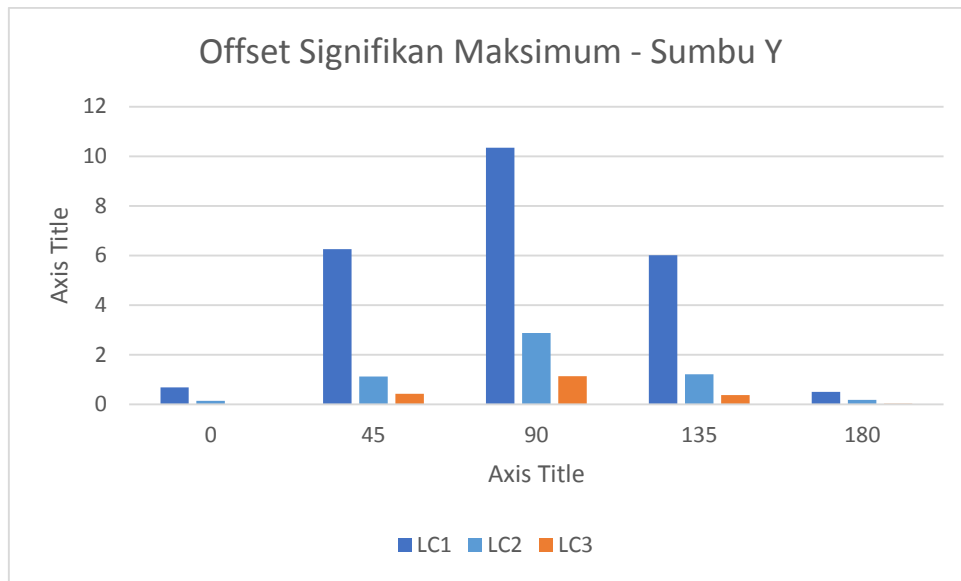
Load Case	Heading (deg)				
	0	45	90	135	180
LC1	2.894402	4.84126	8.542923	5.484509	1.462717
LC2	1.142431	1.373172	0.234441	1.108345	1.277082
LC3	0.570347	0.519163	0.268092	0.496872	0.636438

Perbedaan karakteristik ini disebabkan oleh perbedaan beban yang bekerja untuk tiap-tiap *load case*, pada *Load Case* 1, struktur yang berada tepat di atas permukaan air hanya menerima sedikit gaya *drag* pada bagian bawah struktur, sehingga dapat bergerak dengan sedikit hambatan mengikuti gerakan gelombang dan gerakan kapal.

Sedangkan pada *Load Case* 2 dan 3, beban yang bekerja pada struktur mulai didominasi oleh beban *drag* dan *added mass*, terutama pada *Load Case* 3 yang sudah berada di bawah permukaan air laut, sehingga *offset* signifikan yang terjadi lebih kecil, terutama yang datang dari arah 90°, terjadi *offset* signifikan di minimum sumbu-X karena gelombang datang dari arah sumbu Y.

4.5.3 Offset Signifikan Pada Sumbu Y

Offset signifikan maksimum yang terjadi pada sumbu-Y terjadi pada *Load Case* 1. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.22, bahwa untuk semua arah pembebanan offset signifikan yang paling besar terjadi pada *Load Case* 1. *Offset* signifikan paling kecil pada sumbu-Y terjadi ketika gelombang datang dari arah 0° dan 180°.



Gambar 4.22 Grafik offset signifikan pada sumbu-Y

Dalam Tabel 4.7, dapat dilihat bahwa *offset* signifikan maksimum terjadi pada *Load Case* 1 dengan heading 90°, yaitu sebesar 10.35 m. *Offset* signifikan minimum terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180° yaitu sebesar 0.13 m pada *Load Case* 2 dan hampir bernilai 0 pada *Load Case* 3.

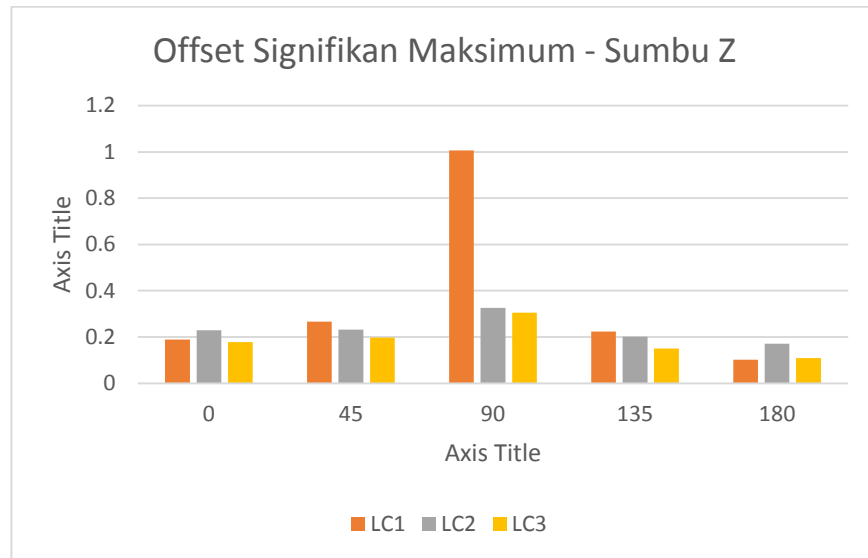
Tabel 4.7 *Offset* Signifikan pada Sumbu Y

Load Case	Heading (deg)				
	0	45	90	135	180
LC1	0.685727	6.253224	10.34719	6.013826	0.498441
LC2	0.13926	1.125383	2.872181	1.219463	0.177177
LC3	0.019376	0.423508	1.133152	0.369907	0.024199

4.5.4 Offset Signifikan Pada Sumbu Z

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.23., *Offset* signifikan maksimum pada sumbu Z terjadi pada *Load Case* 1 sebesar 1.01 m saat arah datang gelombang 90°. Karakteristik *offset* signifikan pada *Load Case* 1 serupa dengan dengan yang terjadi pada semua sumbu, yaitu *offset* signifikan maksimum terjadi akibat gelombang yang datang dari arah 90°

Ketika gelombang datang dari arah 90°, luasan daerah pada struktur *subsea manifold* yang terkena beban hidrodinamis lebih besar dibanding ketika gelombang datang dari arah 0° dan 180°.



Gambar 4.23 Grafik *offset* signifikan sumbu Z

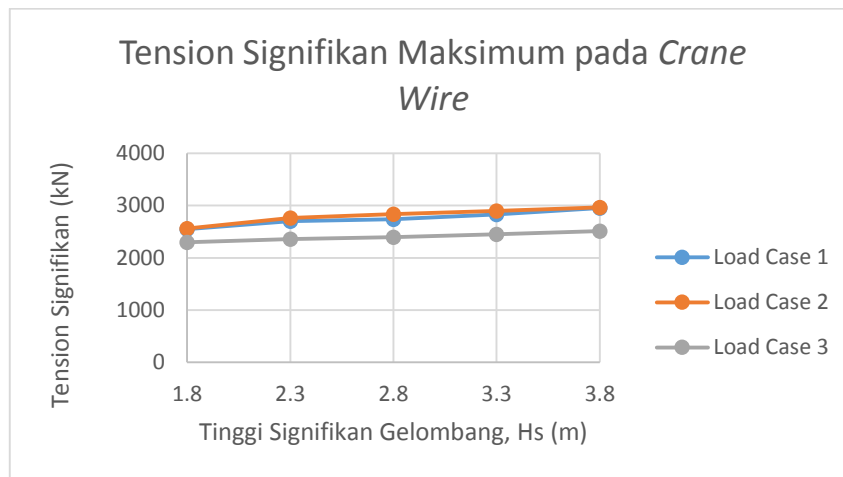
Dapat dilihat pada Tabel 4.8, offset signifikan pada *Load Case* 1 lebih besar jika dibandingkan dengan *Load Case* 2 dan 3. Ini disebabkan oleh perbedaan beban yang bekerja untuk tiap load cases, pada *Load Case* 2 dan 3, beban yang bekerja didominasi oleh beban *drag* dan *added mass*, sedangkan pada *Load Case* 1 beban *drag* pada bagian bawah struktur kecil jika dibandingkan dengan gerakan kapal akibat eksitasi gelombang dari arah datang 90°.

Tabel 4.8 *Offset* signifikan pada sumbu-Z

Load Case	Heading (deg)				
	0	45	90	135	180
LC1	0.189411	0.266806	1.00668	0.223901	0.101492
LC2	0.228885	0.231563	0.326373	0.201456	0.171542
LC3	0.178646	0.197612	0.305827	0.149956	0.109215

4.7 Besar *Tension* pada *Sling* Selama Operasi

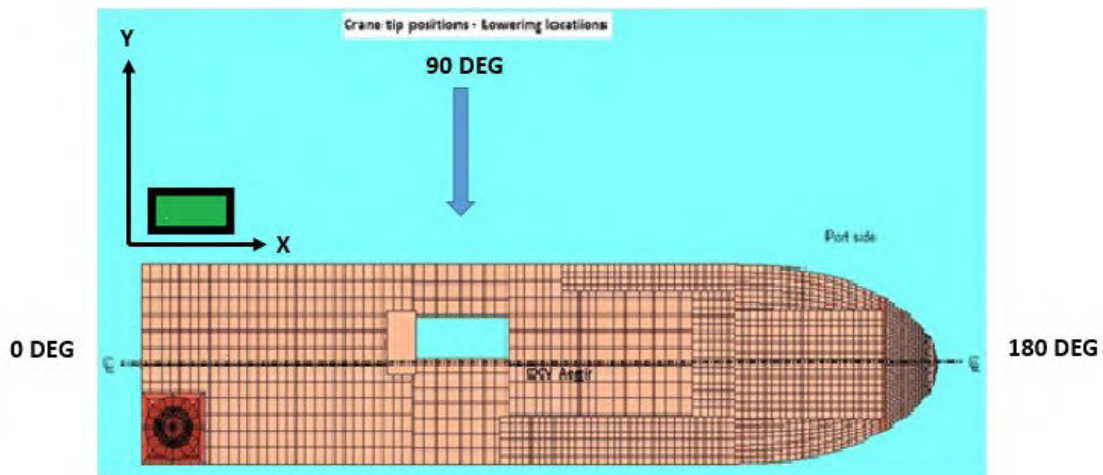
Setelah dilakukan simulasi *time domain* untuk tiap *load case* dengan variasi tinggi signifikan gelombang, seperti yang dapat diamati pada Gambar 4.24, kesimpulan yang dapat ditarik adalah bahwa semakin besar nilai tinggi signifikan gelombang yang berpropagasi, semakin besar pula nilai *tension* signifikan untuk tiap-tiap *sling* di semua *load-case*.



Gambar 4.24 Grafik *tension* signifikan terhadap fungsi H_s

Meskipun hasil analisis menunjukkan bahwa respons gerakan struktur paling besar terjadi pada *Load Case 1*, namun *tension* signifikan pada *crane wire* terbesar selalu terjadi pada *Load Case 2* seperti yang dapat diamati pada Gambar 4.24. Hal ini disebabkan oleh beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur pada *Load Case 2* lebih besar dibandingkan dengan *Load Case 1*.

Tension paling besar terjadi ketika gelombang datang dari arah 90° , dimana luasan daerah *subsea manifold* yang terkena beban hidrodinamis menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan luasan daerah pembebanan ketika gelombang datang dari arah 0° , 45° , 135° , dan 180° . Pada *heading* 90° juga terjadi gerakan *roll* dan *heave* paling besar pada kapal. Gerakan *roll* dan *heave* sangat mempengaruhi gerakan struktur yang diangkat.

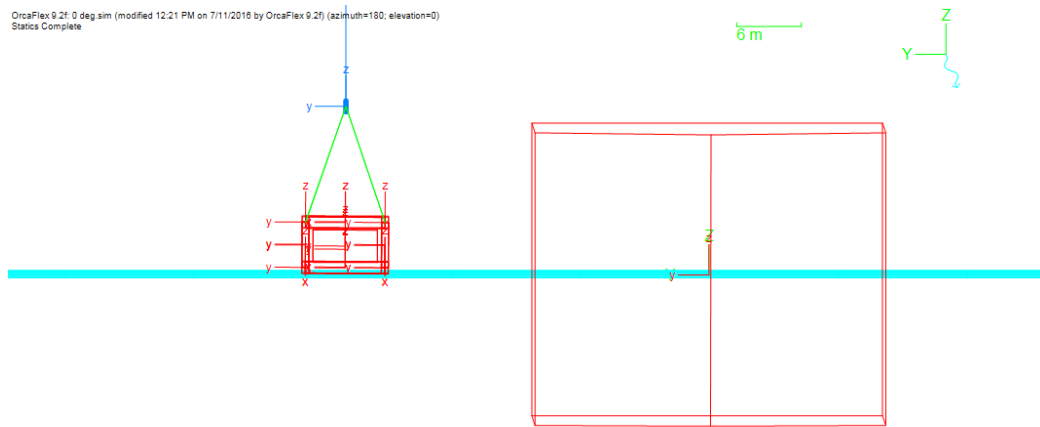


Gambar 4.25 Letak *subsea manifold* dan arah pembebanan

Berdasarkan hasil analisis, sebaiknya operasi penurunan dilakukan pada *heading* 180° atau 0° di mana respons gerakan *subsea manifold* paling minimum terjadi, sehingga rentang batas *sea-state* maksimum untuk menjalankan operasi semakin luas seiring dengan semakin kecil *tension* yang terjadi pada *sling*. Selanjutnya akan dijelaskan besar *tension* signifikan pada *sling* untuk tiap *load case*.

4.7.1 Besar Tension Signifikan Pada Sling untuk Load Case 1

Dilakukan simulasi *time domain* selama 3 jam untuk posisi struktur tepat di atas permukaan air laut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26, pada posisi ini beban yang bekerja pada struktur *subsea manifold* adalah berupa beban inersia dan beban *slamming* pada bagian bawah struktur.



Gambar 4.26 Kondisi struktur berada di atas permukaan air laut

Pada Gambar 4.27 dapat diamati bahwa harga *tension* untuk setiap *sling* semakin besar seiring naiknya tinggi signifikan gelombang, harga *tension* signifikan maksimum paling besar untuk tiap *sling* terjadi pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m.



Gambar 4.27 Grafik kenaikan *tension* terhadap fungsi H_s – Load Case 1

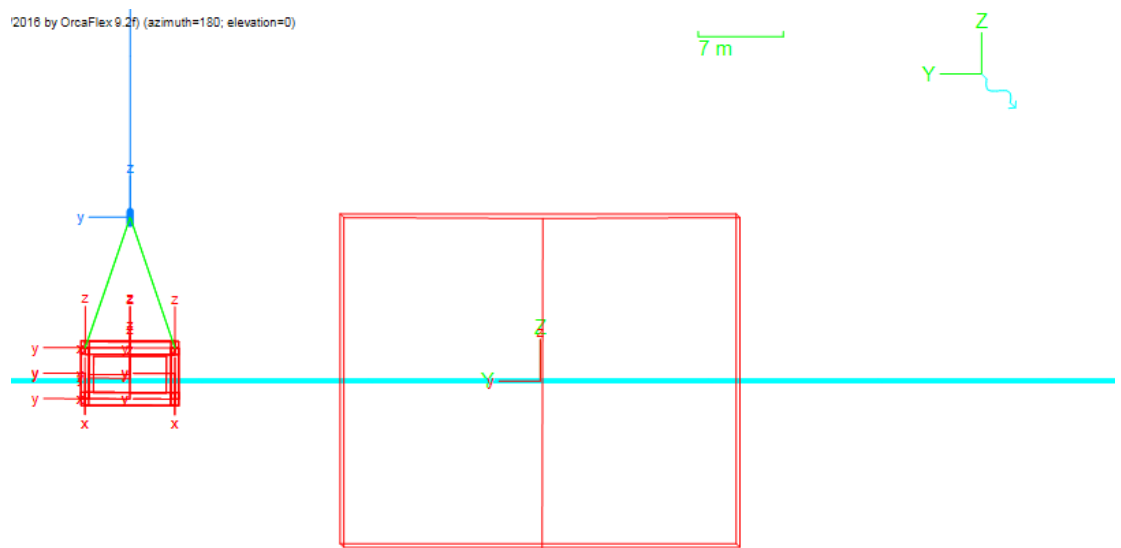
Ringkasan nilai *tension signifikan* untuk tiap-tiap *sling* pada Load Case 1 diberikan dalam Tabel 4.9, dapat dilihat bahwa *tension* terbesar untuk setiap *sling* terjadi pada saat tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m. Pada Load Case 1 terjadi kegagalan untuk semua *sling* pada $H_s = 3.8$ m. *Tension* signifikan maksimum terjadi pada Sling 1 dengan harga 918.13 kN.

Tabel 4.9 Rangkuman *Tension* signifikan *Load Case 1*

Rigging	Hs (m)	Load Case 1		
		Signifikan Tension (kN)		SF
		Min	Max	
Sling 1	1.8	721.5687694	795.0409091	4.454375
	2.3	682.3536721	810.7127973	4.368267
	2.8	647.3816483	847.2211655	4.18003
	3.3	621.5458724	874.4208194	4.050006
	3.8	623.1568776	918.1314696	3.857193
Sling 2	1.8	721.7409222	794.8926564	4.455205
	2.3	682.4344921	810.6448338	4.368633
	2.8	647.2642735	847.3521108	4.179384
	3.3	621.6360919	874.3453206	4.050356
	3.8	637.9110796	916.8422051	3.862617
Sling 3	1.8	713.7582595	774.6662137	4.57153
	2.3	675.6724958	794.2451253	4.458838
	2.8	638.7375876	831.7119904	4.257976
	3.3	612.3557693	858.5069136	4.12508
	3.8	623.7899701	896.7430633	3.949191
Sling 4	1.8	713.7659507	774.634651	4.571716
	2.3	675.496342	794.408395	4.457921
	2.8	638.9868335	831.4492334	4.259322
	3.3	612.1892796	858.6586356	4.124351
	3.8	623.1568776	897.8214411	3.944448

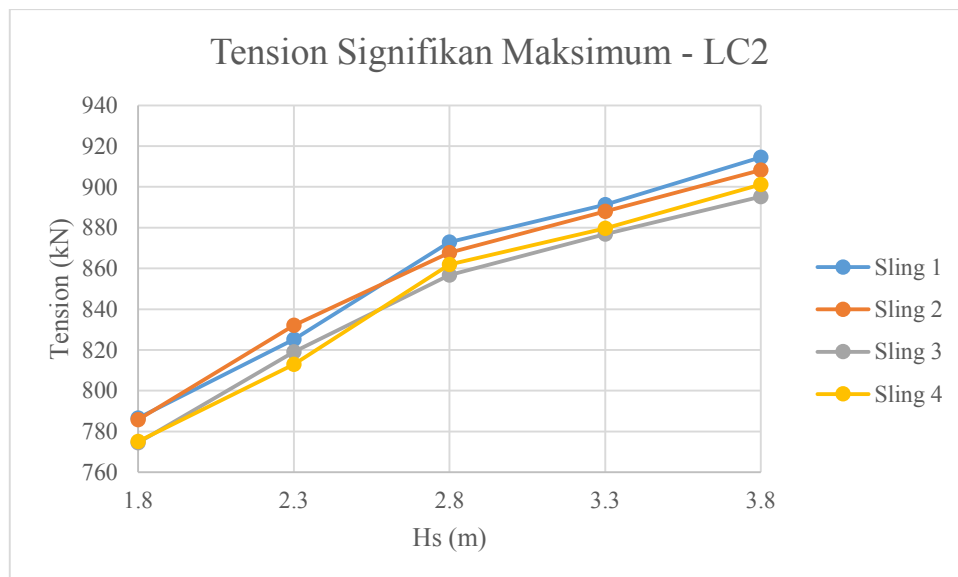
4.7.2 Besar *Tension* Signifikan Pada *Sling* untuk Load Case 2

Dilakukan simulasi *time domain* selama 3 jam untuk posisi struktur sebagian di dalam air laut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.28, pada posisi ini beban yang bekerja pada struktur *subsea manifold* adalah berupa beban inersia, gaya *drag*, *added mass*, dan *buoyancy* yang bervariasi tergantung volume terendam struktur.



Gambar 4.28 Kondisi struktur sebagian terbenam di dalam laut

Pada Gambar 4.29 dapat diamati bahwa harga *tension* signifikan maksimum untuk setiap *sling* semakin besar seiring naiknya harga tinggi signifikan gelombang, harga *tension* signifikan maksimum paling besar untuk tiap *sling* terjadi pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m.



Gambar 4.29 Grafik kenaikan *tension* terhadap fungsi H_s – Load Case 2

Ringkasan nilai *tension* signifikan untuk tiap-tiap *sling* pada *Load Case 2* diberikan dalam Tabel 4.10, dapat dilihat bahwa *tension* terbesar untuk setiap *sling* terjadi pada saat tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m, namun terjadi kegagalan pada *Sling 1* dan *Sling 2* untuk $H_s = 3.3$ m dan $H_s = 3.8$ m.

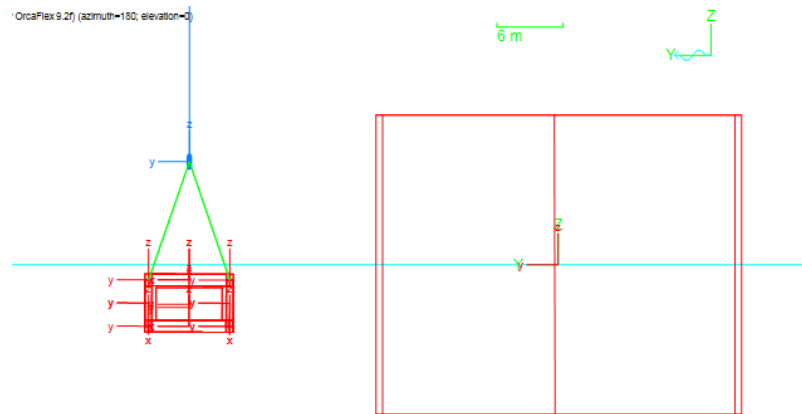
Pada $H_s = 3.3$ m harga *tension* signifikan maksimum adalah sebesar 891.3 kN terjadi pada *Sling 1*, dan pada $H_s = 3.8$ m harga *tension* signifikan maksimum adalah 914.48 kN yang juga terjadi pada *Sling 1*. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa beban hidrodinamis paling besar yang bekerja pada struktur *subsea manifold* terjadi pada *Load Case 2*.

Tabel 4.10 Rangkuman Tension Signifikan Load Case 2

Rigging	Hs (m)	Load Case 2		
		Signifikan Tension		SF
		Min	Max	
Sling 1	1.8	668.2489	786.5191	4.502637
	2.3	628.3411	825.2401	4.291369
	2.8	580.376	872.9774	4.056703
	3.3	563.3661	891.3045	3.973289
	3.8	542.3708	914.4814	3.872588
Sling 2	1.8	668.9801	785.8311	4.506579
	2.3	621.465	832.0776	4.256105
	2.8	585.5795	867.7934	4.080937
	3.3	566.8045	887.9917	3.988111
	3.8	548.7887	908.2211	3.899282
Sling 3	1.8	661.1933	774.4488	4.572814
	2.3	615.0872	819.1418	4.323317
	2.8	577.1195	856.6884	4.133837
	3.3	557.8212	876.8843	4.038628
	3.8	541.059	895.2141	3.955937
Sling 4	1.8	660.488	775.111	4.568907
	2.3	621.2743	812.9929	4.356016
	2.8	571.8193	861.969	4.108512
	3.3	554.8497	879.7305	4.025562
	3.8	535.0179	901.098	3.930105

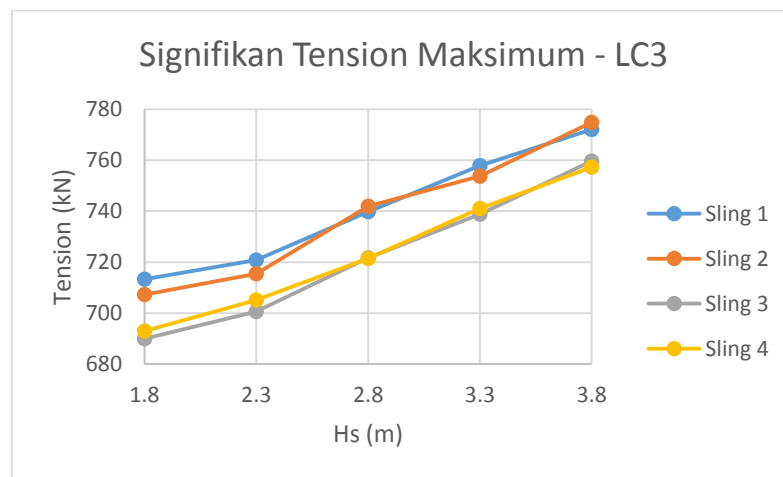
4.7.3 Besar *Tension* Signifikan Pada *Sling* untuk Load Case 3

Dilakukan simulasi *time domain* selama 3 jam untuk posisi struktur sepenuhnya berada di dalam air laut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30, pada posisi ini beban yang bekerja pada struktur *subsea manifold* hanyalah beban *drag* dan beban massa tambah.



Gambar 4.30 Kondisi struktur sepenuhnya berada di dalam air laut

Pada Gambar 4.31 dapat diamati bahwa harga *tension* signifikan maksimum untuk setiap *sling* semakin besar seiring naiknya harga tinggi signifikan gelombang, harga *tension* signifikan maksimum paling besar untuk tiap *sling* terjadi pada saat tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m.



Gambar 4.31 Grafik kenaikan tension terhadap fungsi H_s – Load Case 3

Ringkasan nilai *tension* signifikan untuk tiap-tiap *sling* pada *Load Case 3* diberikan dalam Tabel 4.11, dapat dilihat bahwa *tension* terbesar untuk setiap *sling* terjadi pada saat tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m. Tidak terjadi kegagalan untuk semua *sling* pada semua variasi tinggi signifikan gelombang. Hal ini dikarenakan beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur kecil, yaitu hanya gara drag dan massa tambah, serta berkurangnya berat struktur diakibatkan *buoyancy* yang bekerja ketika struktur *subsea manifold* terbenam di dalam air laut.

Tabel 4.11 – Rangkuman *tension* signifikan *Load Case 3*

Rigging	Hs (m)	Di Bawah Permukaan Air		
		Signifikan Tension		SF
		Min	Max	
Sling 1	1.8	622.526	713.262	4.96509
	2.3	615.3571	720.8646	4.912726
	2.8	596.9435	739.8034	4.786961
	3.3	579.972	757.9083	4.67261
	3.8	567.1133	772.0626	4.586947
Sling 2	1.8	628.5458	707.2491	5.007302
	2.3	620.8408	715.4149	4.950149
	2.8	594.7458	741.9834	4.772897
	3.3	584.2665	753.6844	4.698797
	3.8	564.2939	774.804	4.570717
Sling 3	1.8	626.7061	689.9274	5.133018
	2.3	616.496	700.6554	5.054424
	2.8	595.9302	721.7525	4.906682
	3.3	580.1775	738.7716	4.793647
	3.8	560.4657	759.6334	4.661999
Sling 4	1.8	623.6962	692.9312	5.110767
	2.3	611.9913	705.1265	5.022375
	2.8	596.2369	721.4627	4.908653
	3.3	577.8443	741.0351	4.779005
	3.8	562.8931	757.2838	4.676464

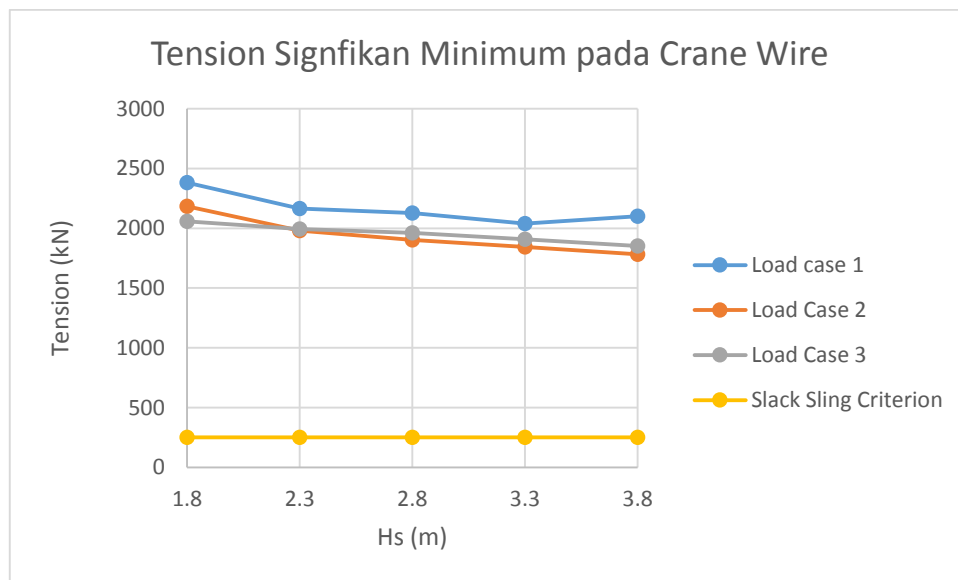
4.8 Seastate Maksimum yang Diizinkan

Penentuan batas *sea-state* maksimum dimana operasi penurunan masih dapat dijalankan mengacu pada code DNV RP-H103 *Section 4.4 Accept Criteria*. Kriteria

yang dipertimbangkan adalah *slack sling criterion* dan *sling capacity checks*. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, tidak terjadi *slack sling* selama operasi penurunan, namun terjadi kegagalan sling pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.3$ m dan $H_s = 3.8$ m, yaitu *safety factor sling* lebih kecil dari 4. Sehingga dibuat batasan *sea-state* maksimum operasi dapat dijalankan, yaitu pada $H_s = 2.8$ m. Tidak disarankan untuk menjalankan operasi penurunan ketika tinggi signifikan gelombang melewati batas yang sudah ditetapkan.

4.8.1 Slack Sling Criterion

Slack sling terjadi karena beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur melebihi berat statis struktur sehingga menyebabkan beban pada *sling* menjadi sangat kecil, *slack sling* mengakibatkan *snap load* yang mana jika *snap load* melebihi kapasitas *sling* yang dipakai dalam operasi, *sling* sangat mungkin untuk putus.



Gambar 4.34 Grafik tension signifikan minimum

Menurut DNV, *slack sling* terjadi ketika beban hidrodinamis sama dengan atau lebih kecil dari 10% berat statis struktur, yang mana harganya adalah 25.1 MT. Berdasarkan hasil simulasi *time domain* yang telah dilakukan tidak terdapat *tension* signifikan yang harganya sama dengan atau lebih kecil dari 25.1 MT. Sehingga tidak terdapat *slack sling* dan *snap load* yang melewati kriteria *slack sling*.

4.8.2 Sling Capacity Checks

Kriteria *safety factor* yang dipakai untuk kegiatan *offshore lifting* menurut DNV adalah $SF \geq 4$. Ketika *sling* memiliki $SF \leq 4$, maka *sling* dianggap tidak aman untuk digunakan dalam operasi.

Melalui ringkasan *tension* signifikan pada *Load Case 2* yang disajikan pada Tabel 4.10, *Sling 1* dan *Sling 2* tidak memenuhi kriteria *safety factor* untuk dua variasi tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.3$ m dan $H_s = 3.8$ m.

Tabel 4.x Ringkuman nilai tension Load-Case-2

Rigging	Hs (m)	Load Case 2		
		Signifikan Tension		SF
		Min	Max	
Sling 1	1.8	668.2489	786.5191	4.502637
	2.3	628.3411	825.2401	4.291369
	2.8	580.376	872.9774	4.056703
	3.3	563.3661	891.3045	3.973289
	3.8	542.3708	914.4814	3.872588
Sling 2	1.8	668.9801	785.8311	4.506579
	2.3	621.465	832.0776	4.256105
	2.8	585.5795	867.7934	4.080937
	3.3	566.8045	887.9917	3.988111
	3.8	548.7887	908.2211	3.899282

Pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.3$ m, *safety factor* untuk *Sling 1* adalah $SF = 3.97$ dan pada *Sling 2* $SF = 3.9$, kemudian untuk tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m, *safety factor* untuk *Sling 1* adalah $SF = 3.87$ dan *safety factor* untuk *Sling 2* adalah $SF = 3.9$.

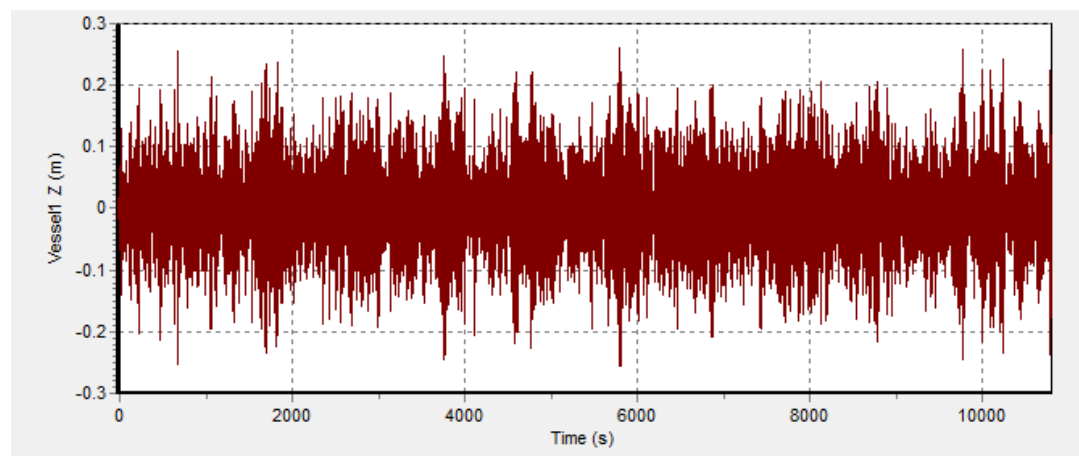
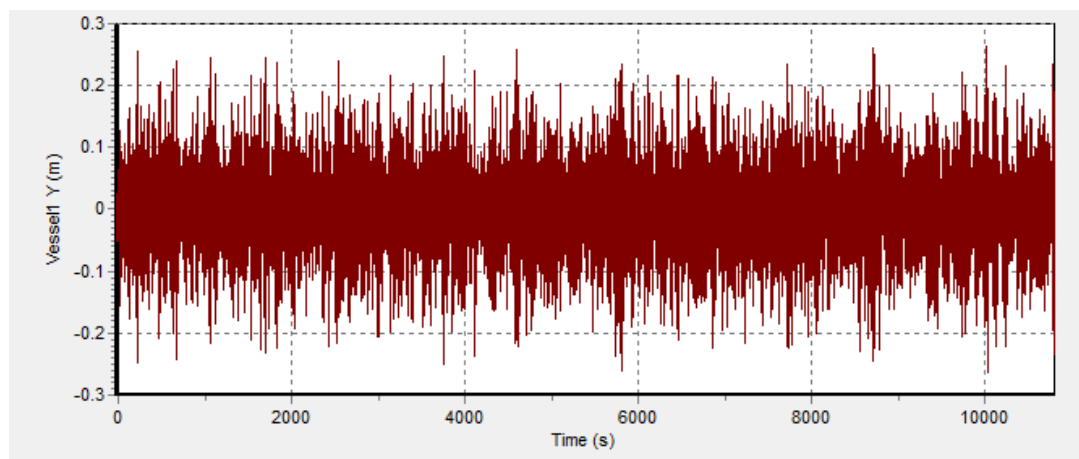
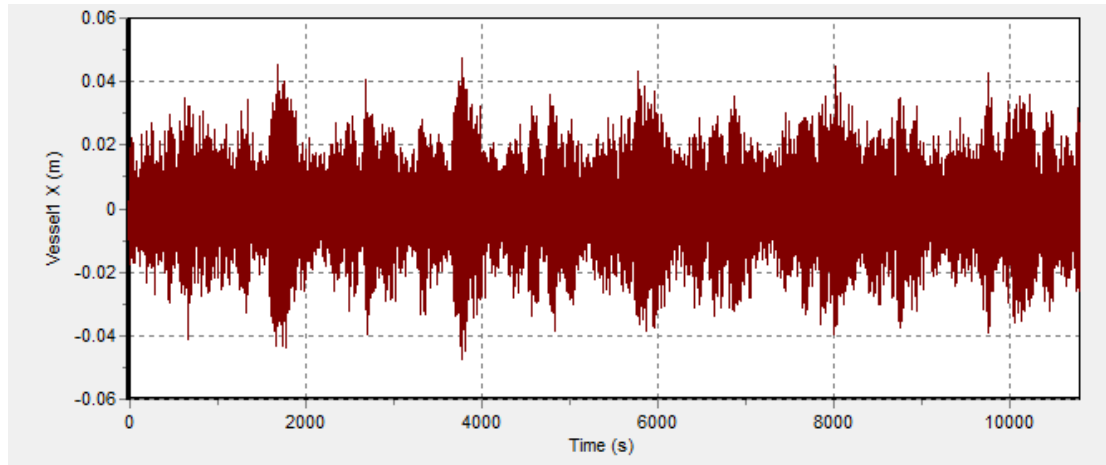
Berdasarkan kriteria dan hasil analisis yang telah didapatkan, disarankan batas aman untuk jalannya operasi penurunan *subsea manifold* adalah pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 2.8$ m. Operasi yang dikerjakan pada tinggi signifikan gelombang $2.8 \text{ m} \leq H_s \leq 3.3 \text{ m}$ berkemungkinan masih dapat dijalankan, namun sangat beresiko untuk melanggar kriteria $SF = 4$ untuk tiap-tiap *sling*.

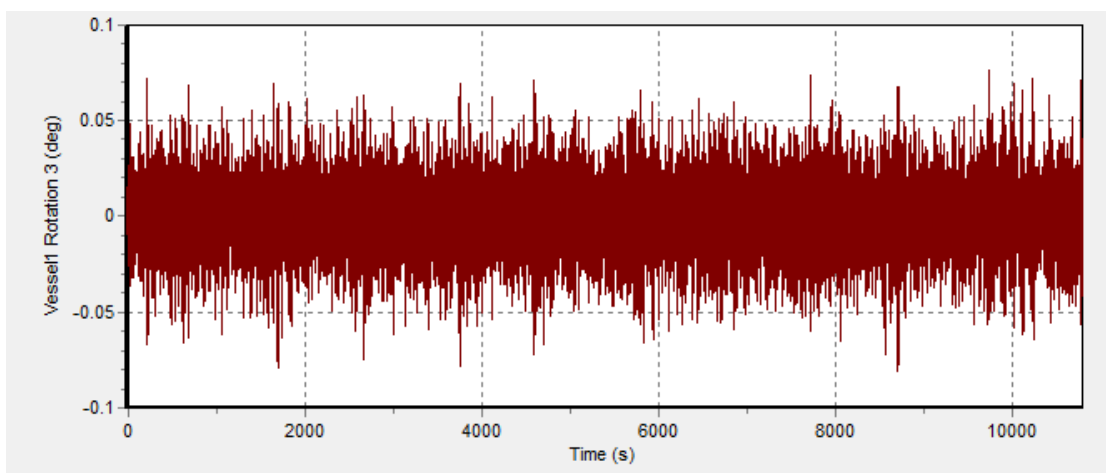
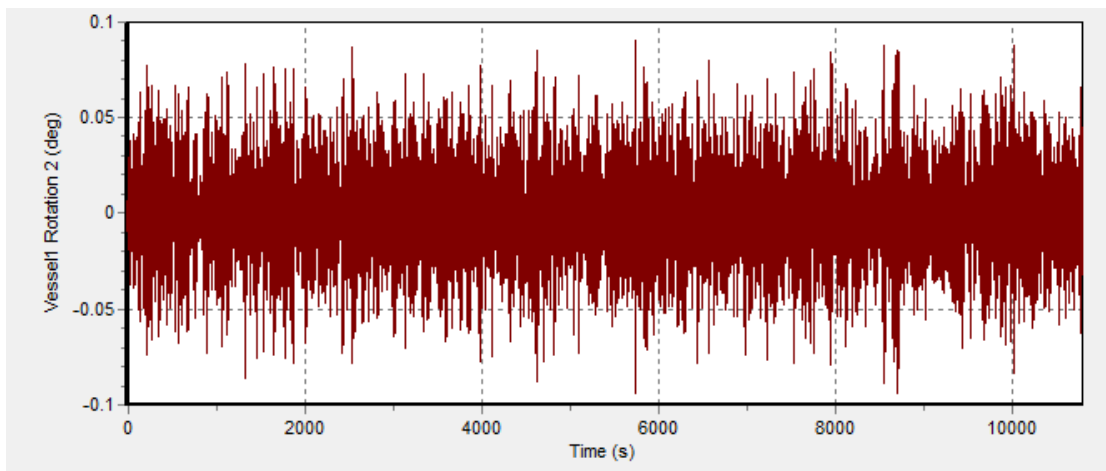
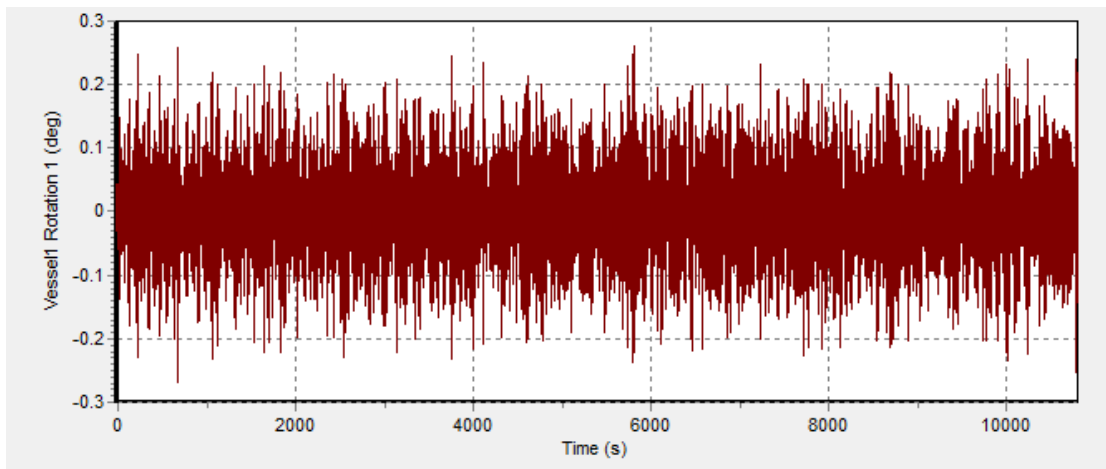
LAMPIRAN I

RESPONS GERAK KAPAL

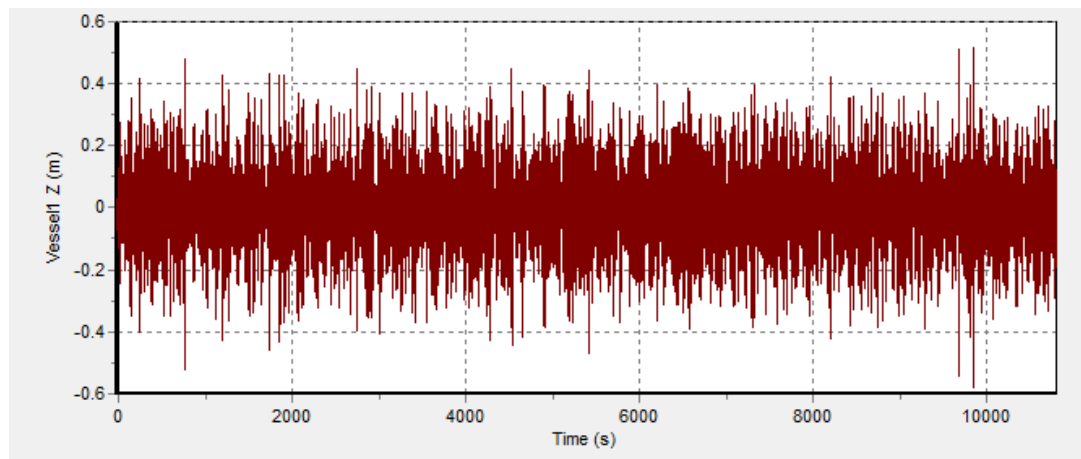
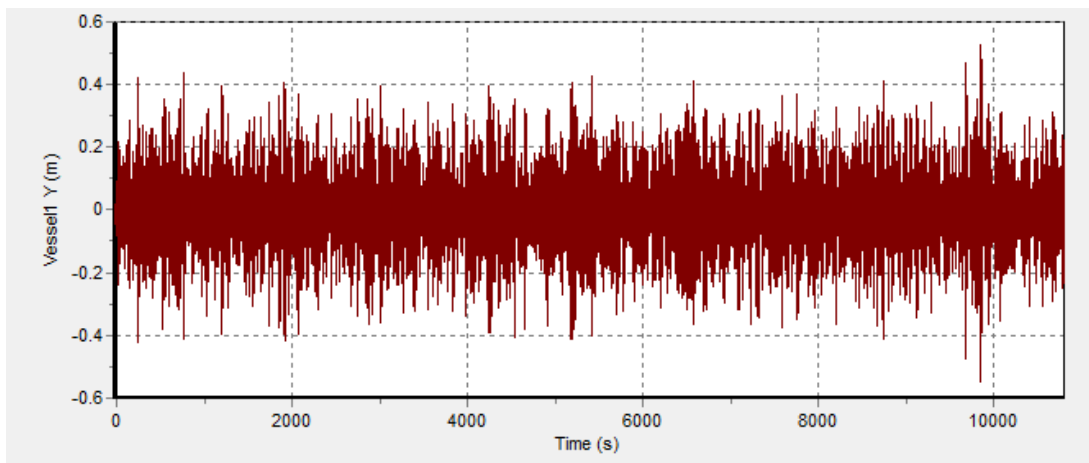
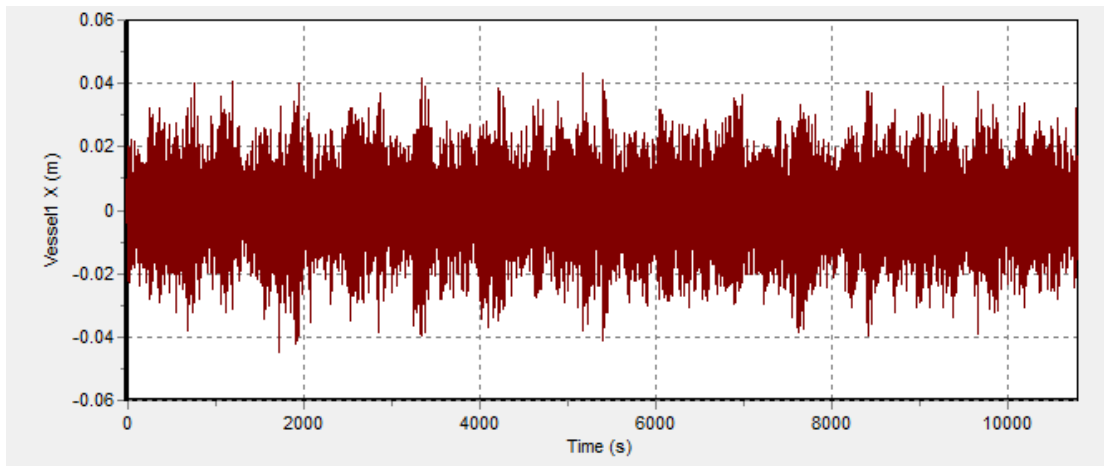
RESPONS GERAK KAPAL LOAD CASE 1

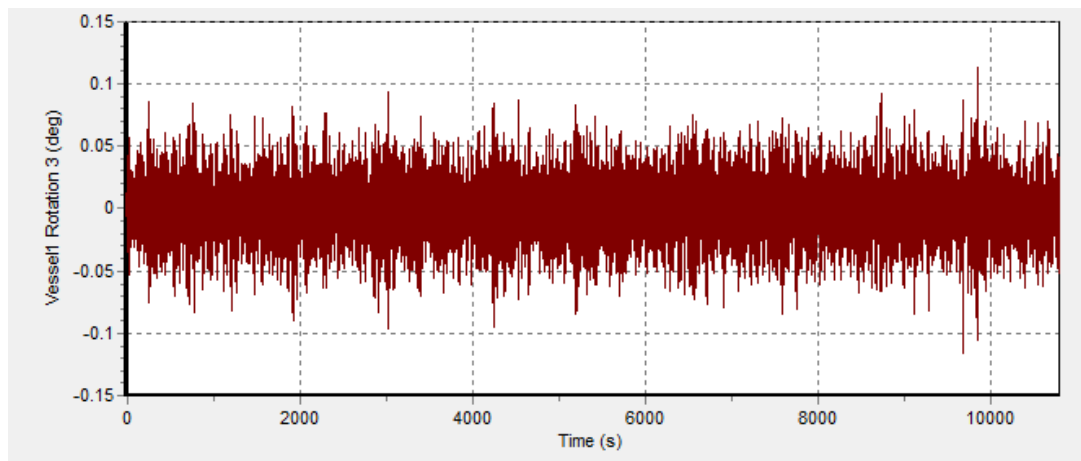
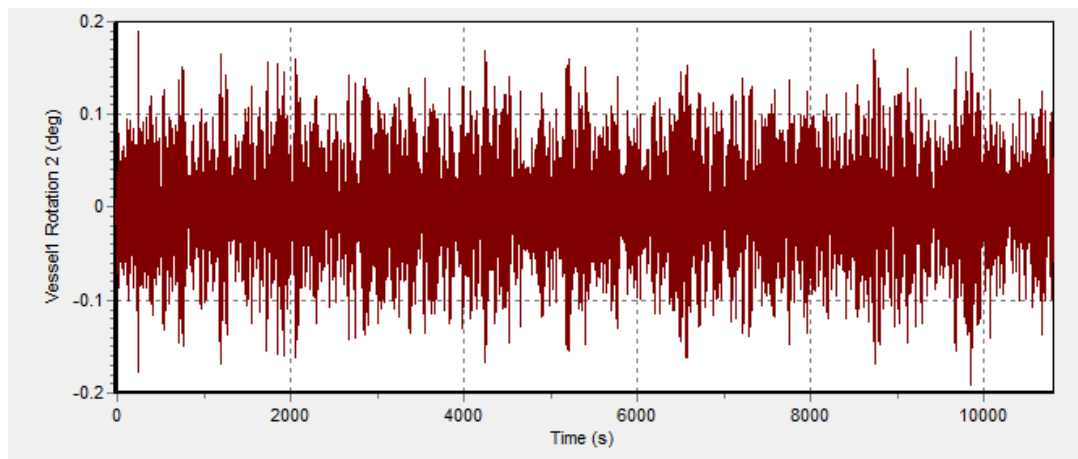
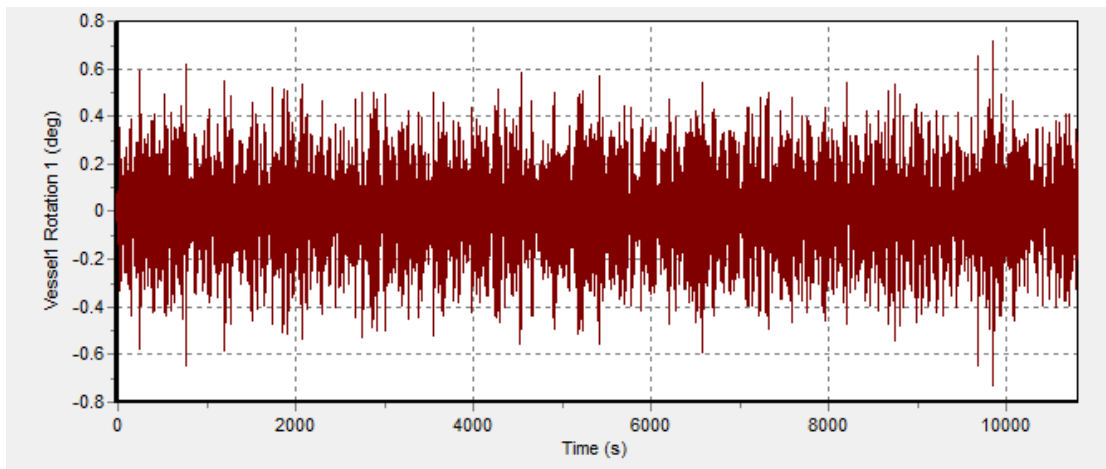
Hs = 1.8 m, Heading 90 deg.



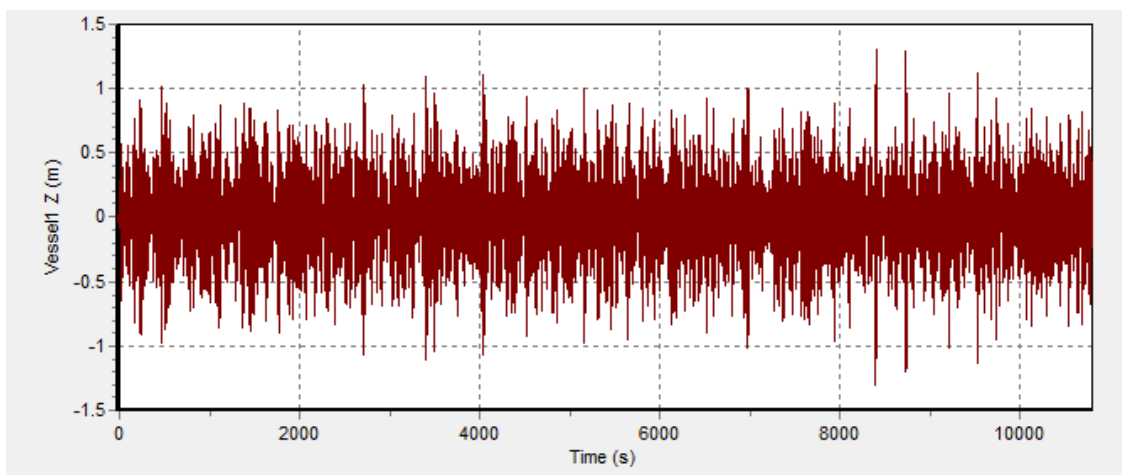
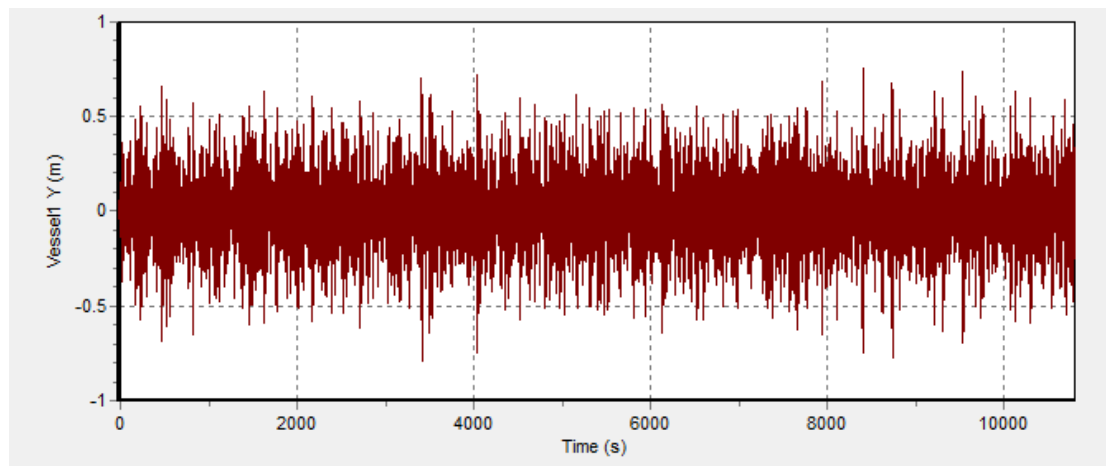
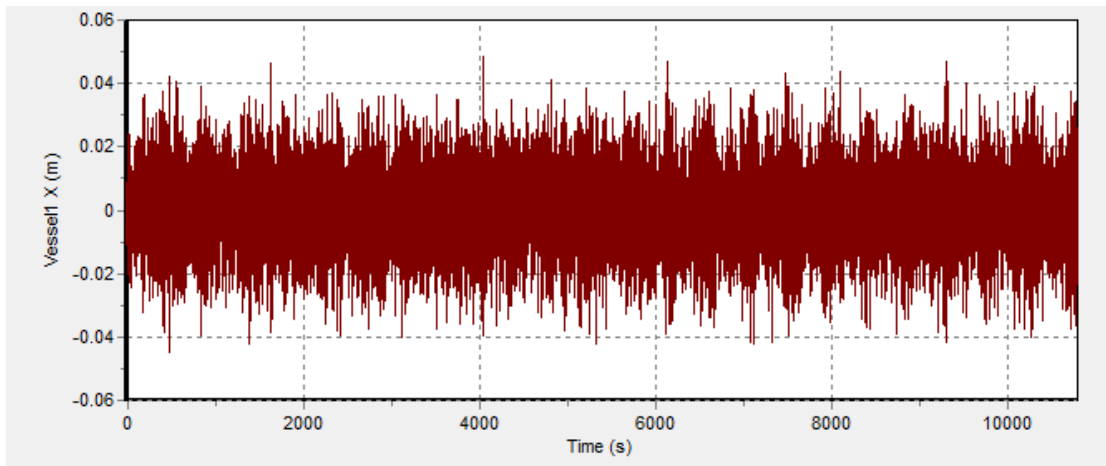


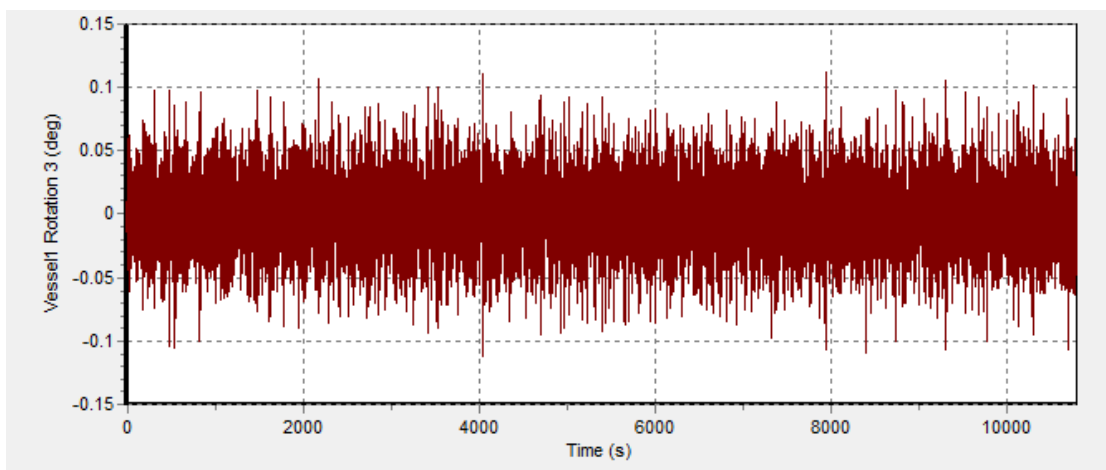
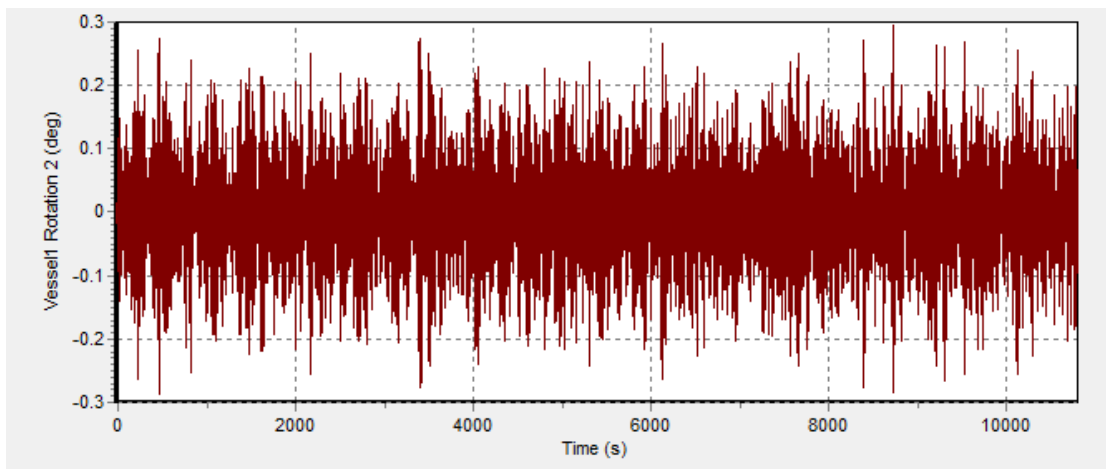
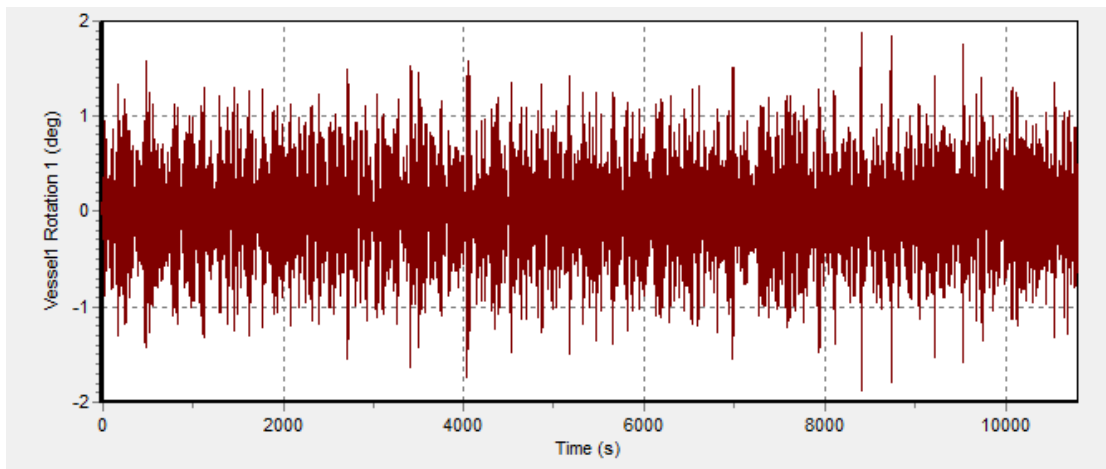
Hs = 2.3 m, Heading 90 deg.



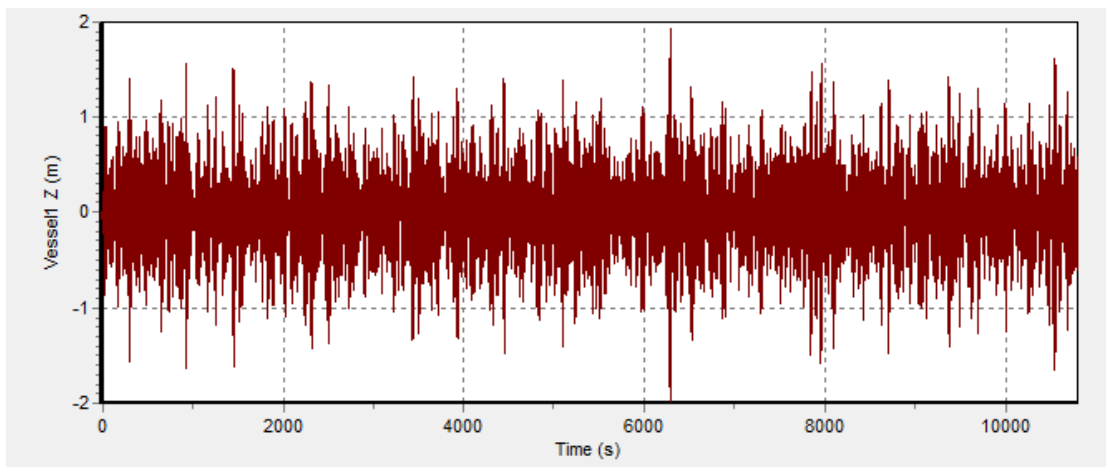
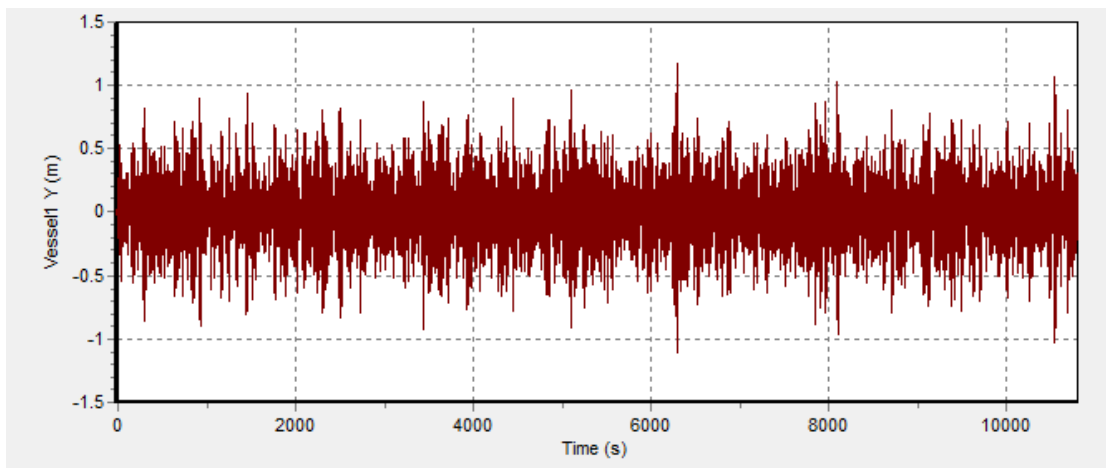
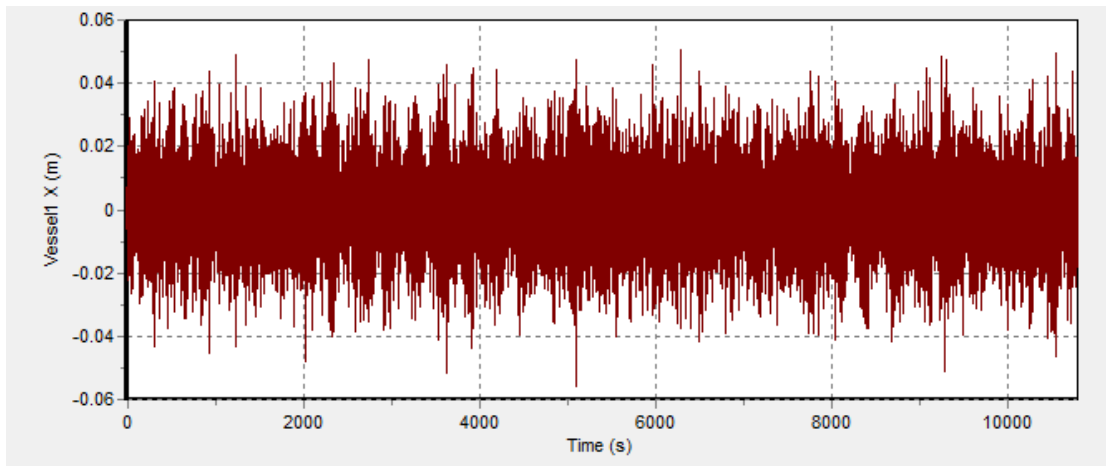


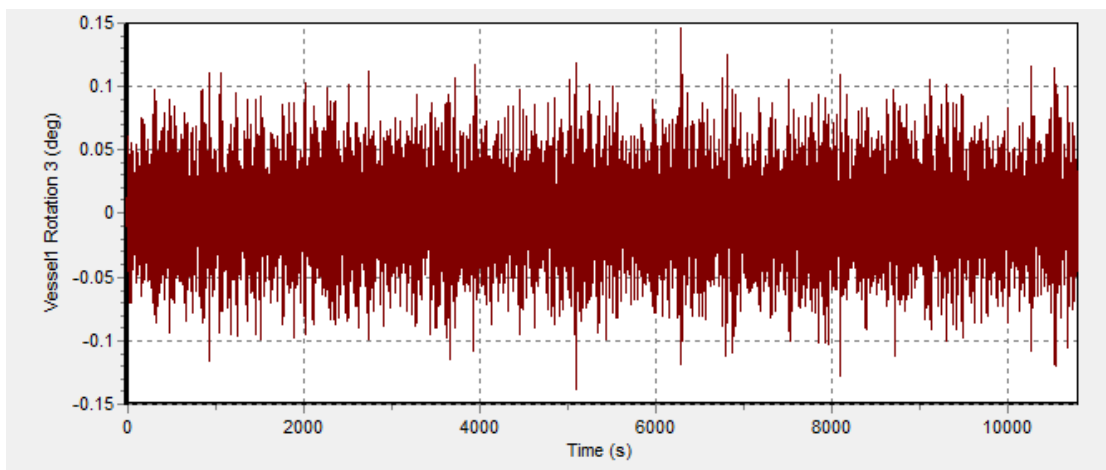
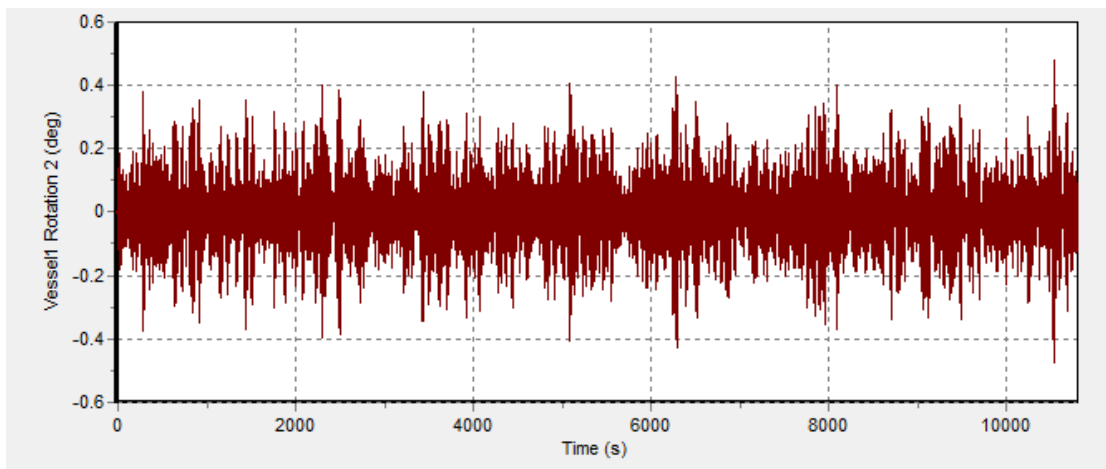
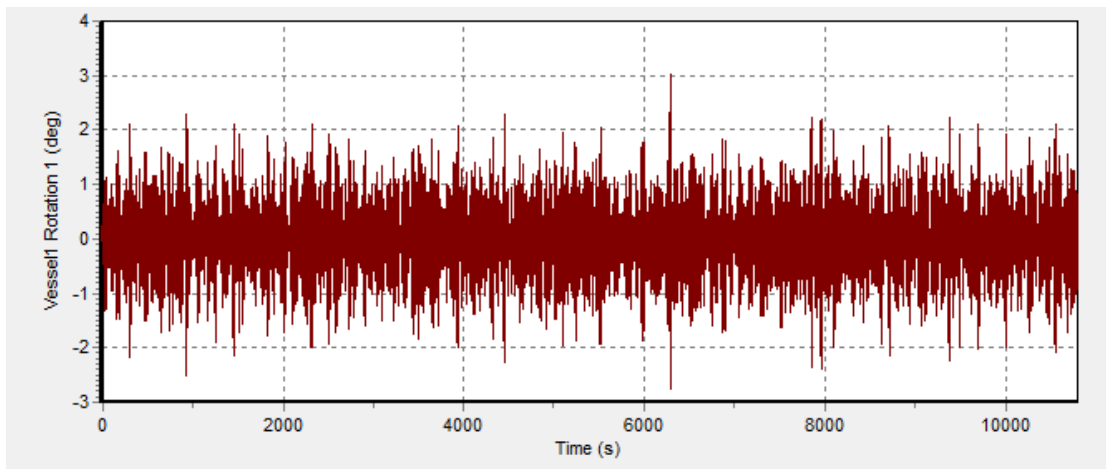
Hs = 2.8 m, Heading 90 deg.



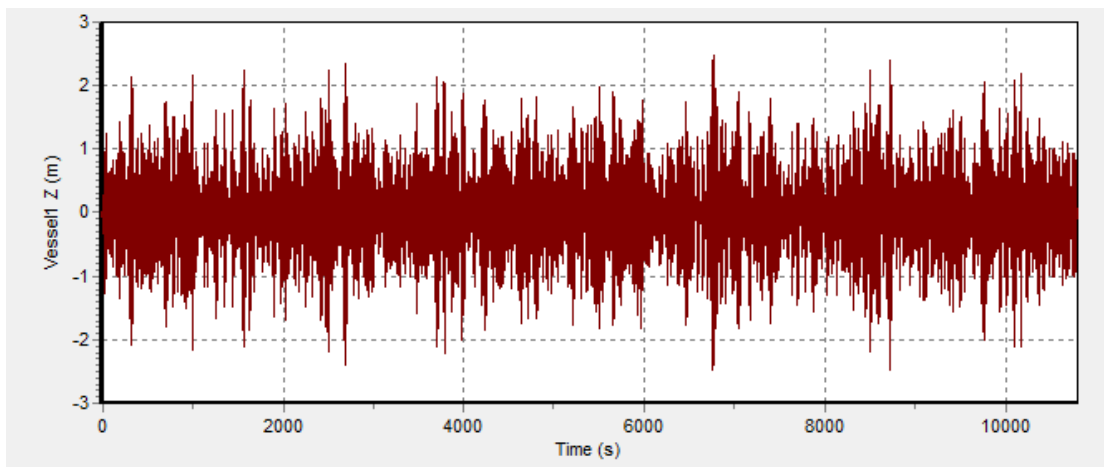
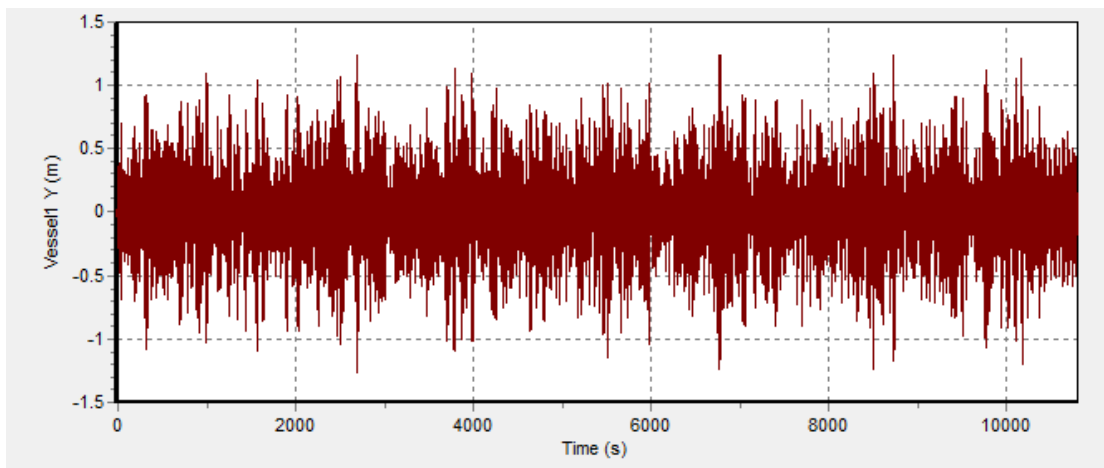
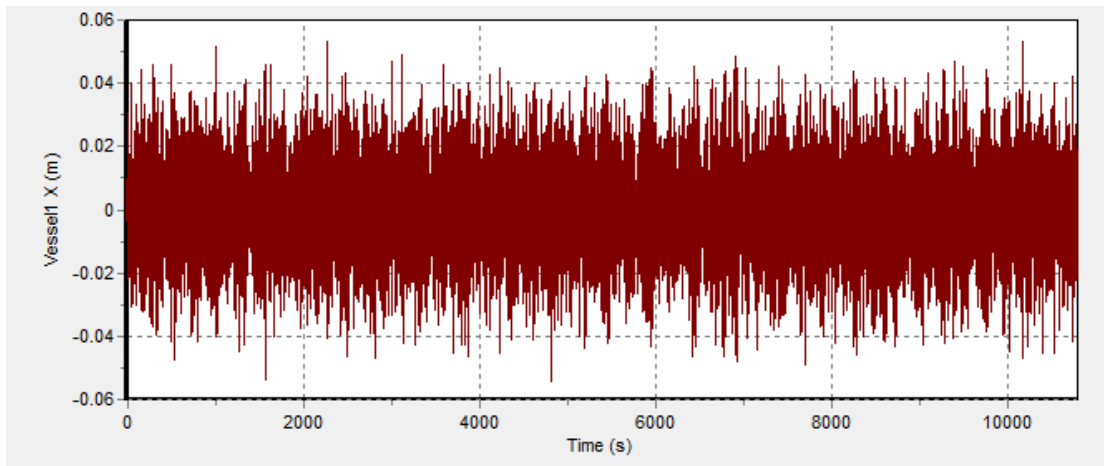


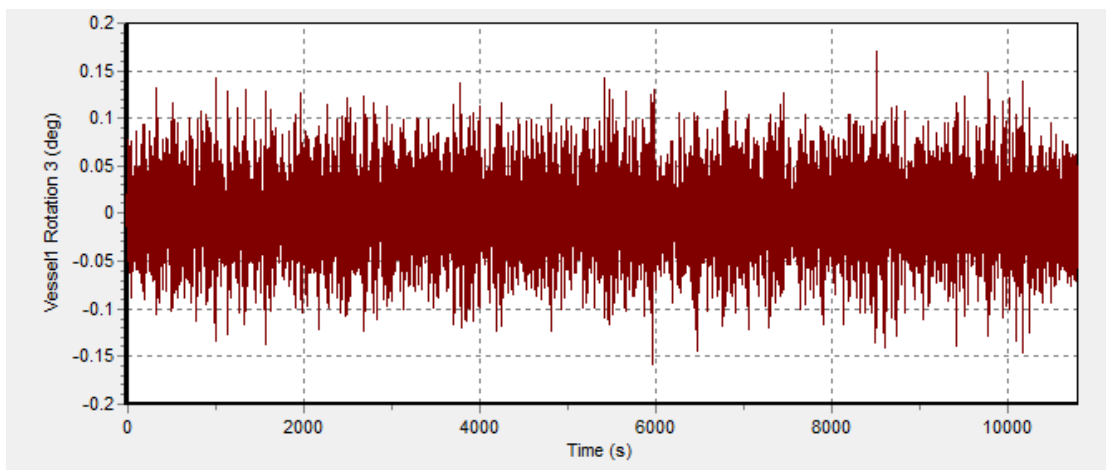
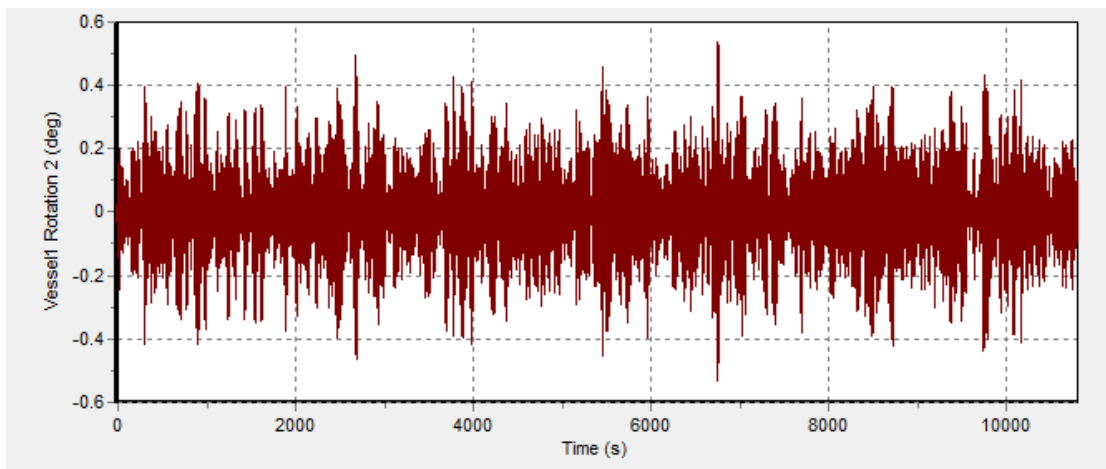
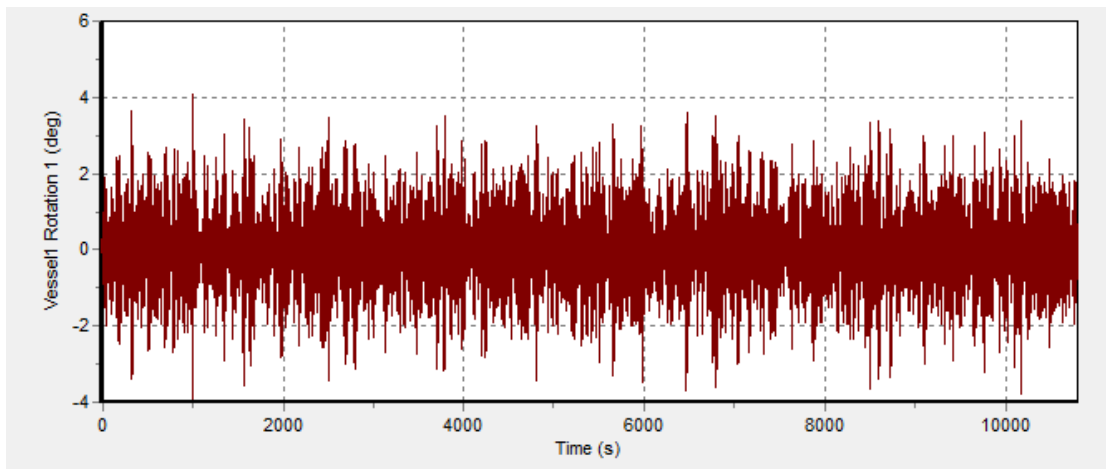
Hs = 3.3 m, Heading 90 deg.





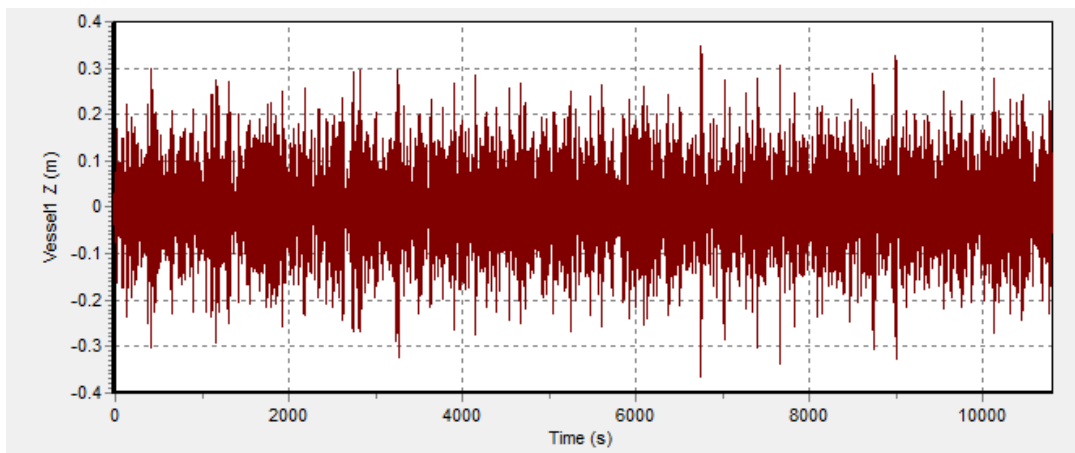
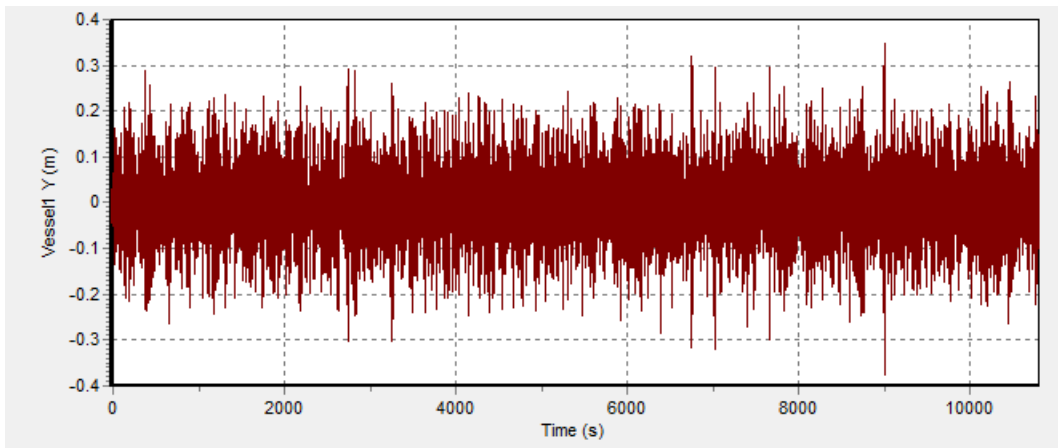
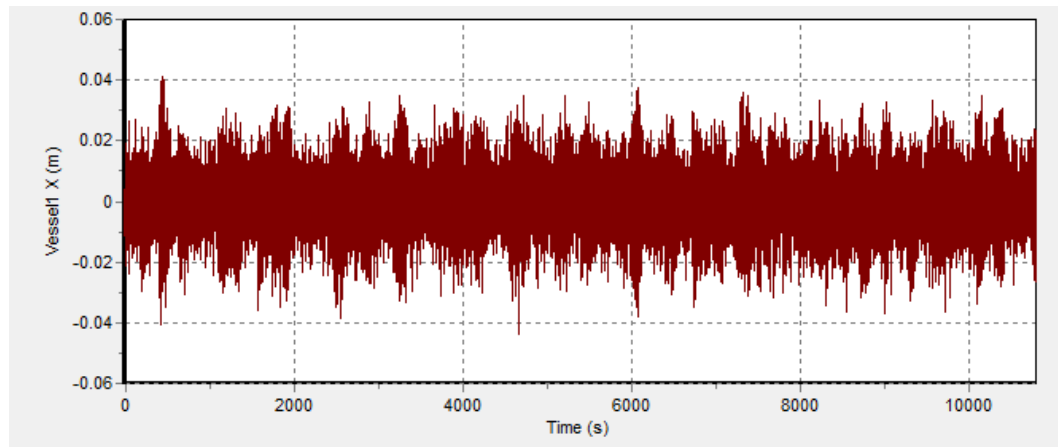
Hs = 3.8 m, Heading 90 deg.

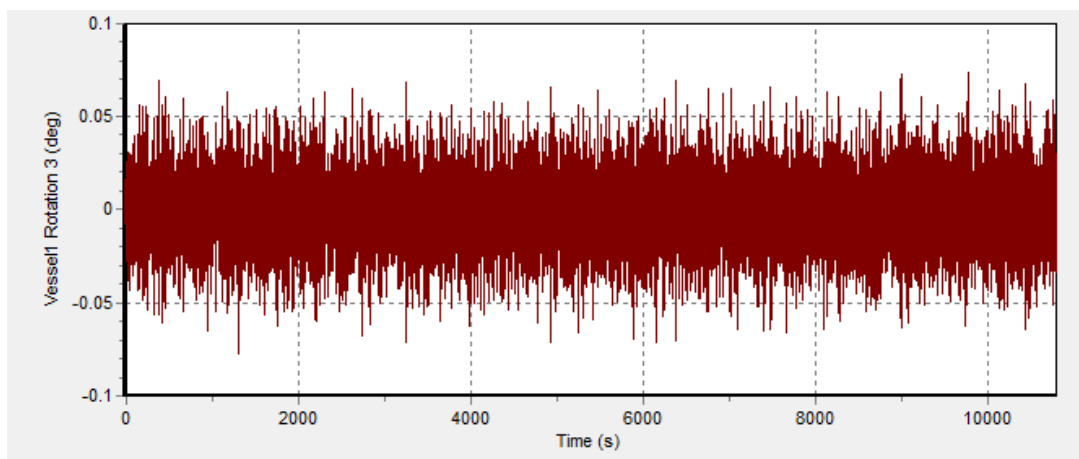
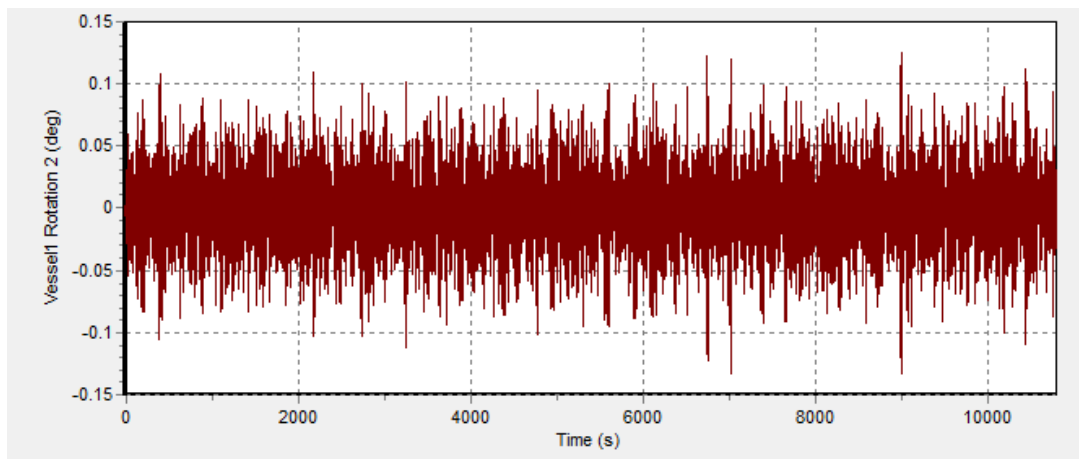
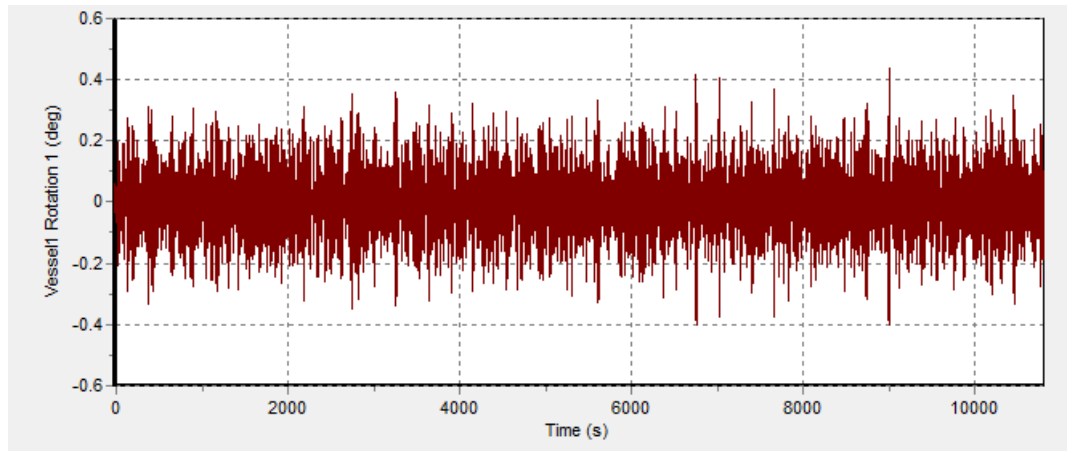




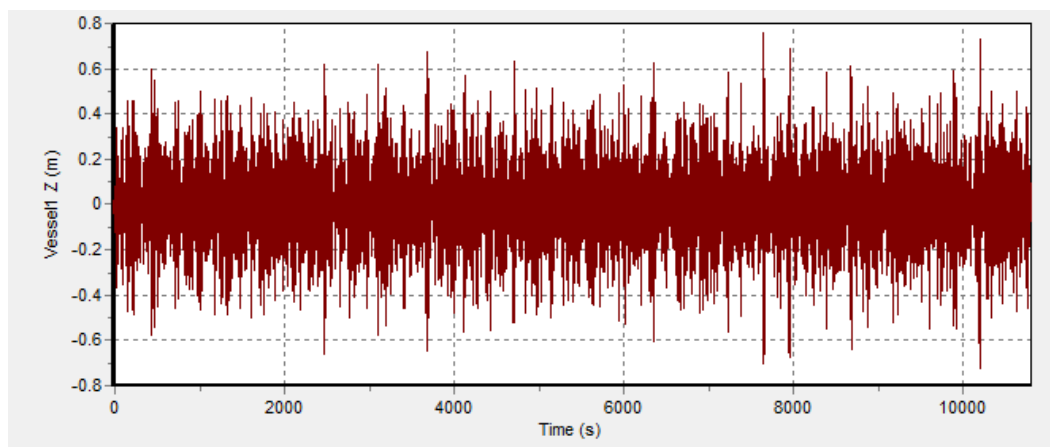
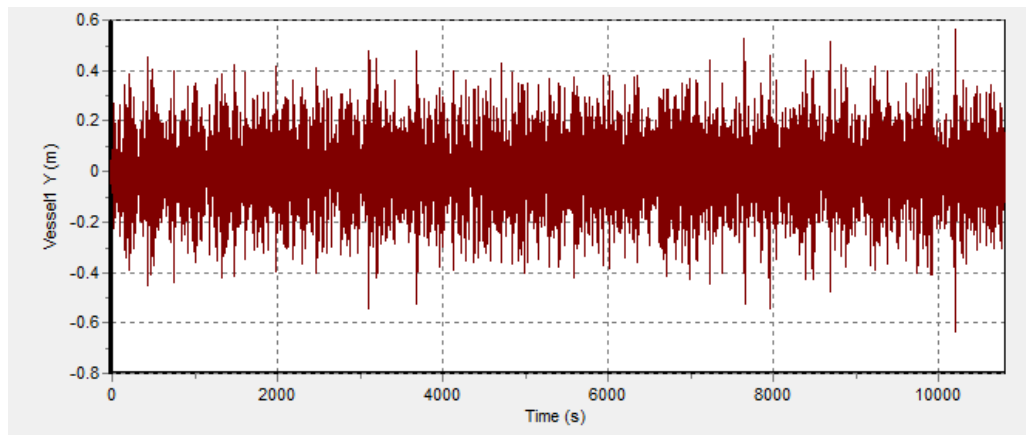
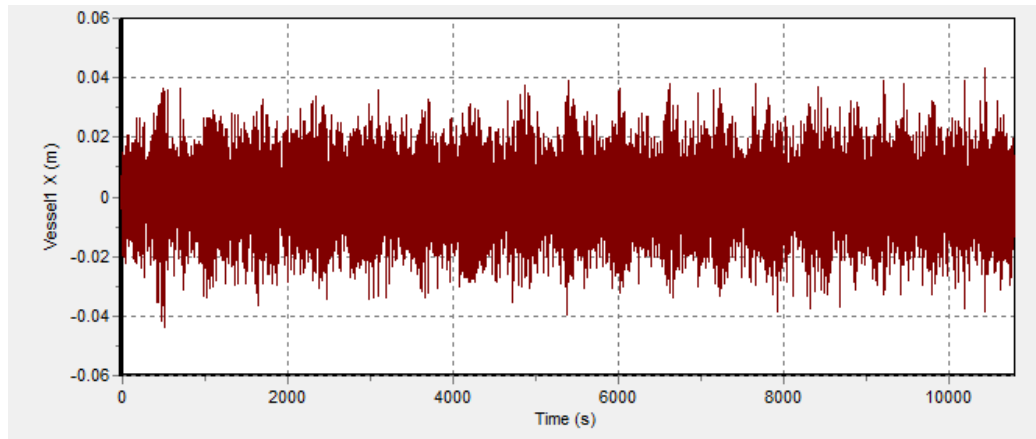
RESPONS GERAK KAPAL LOAD CASE 2

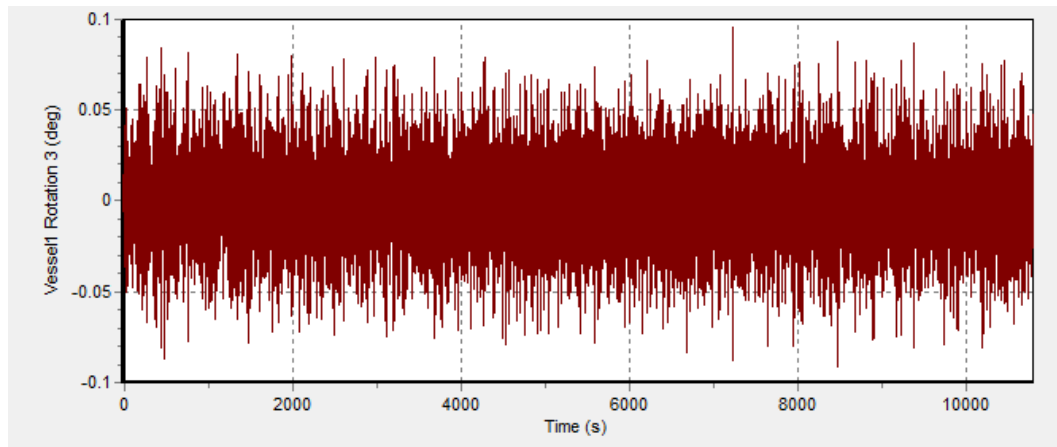
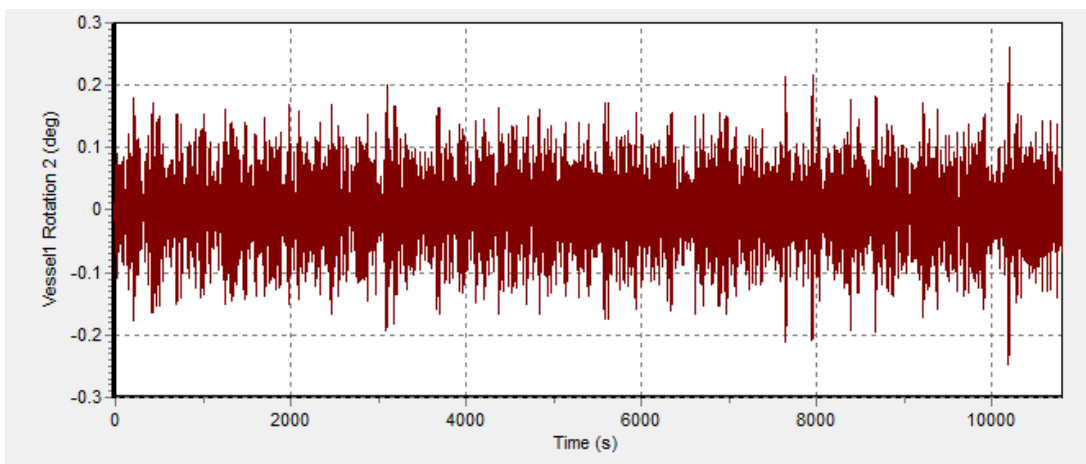
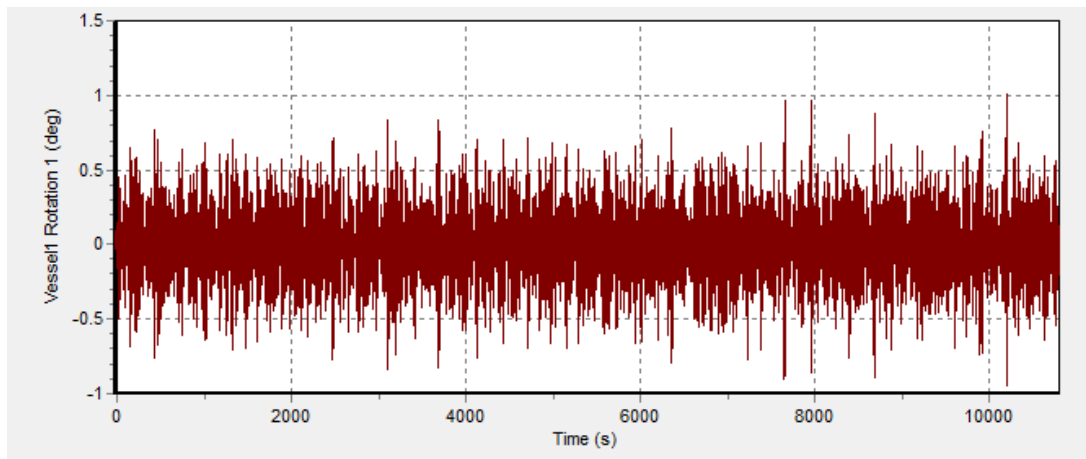
Hs = 1.8 m, Heading 90 deg.



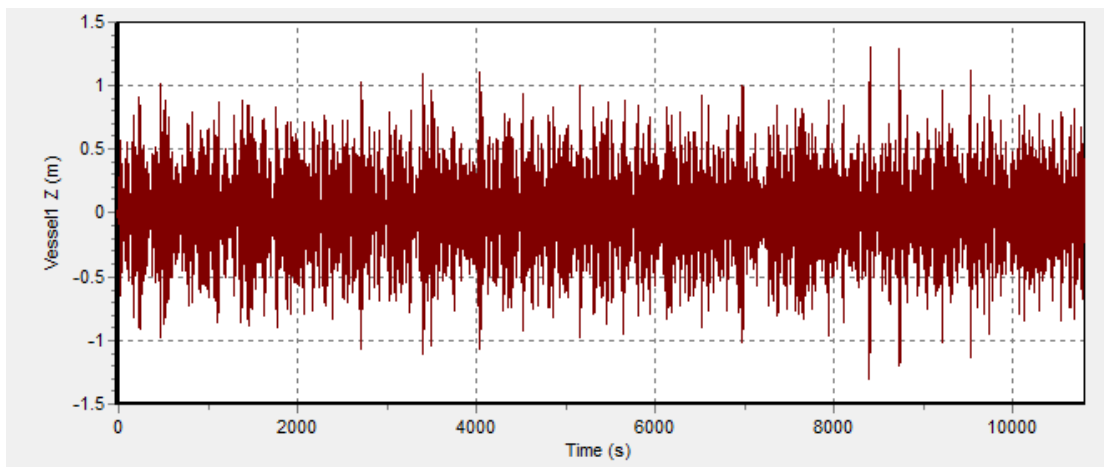
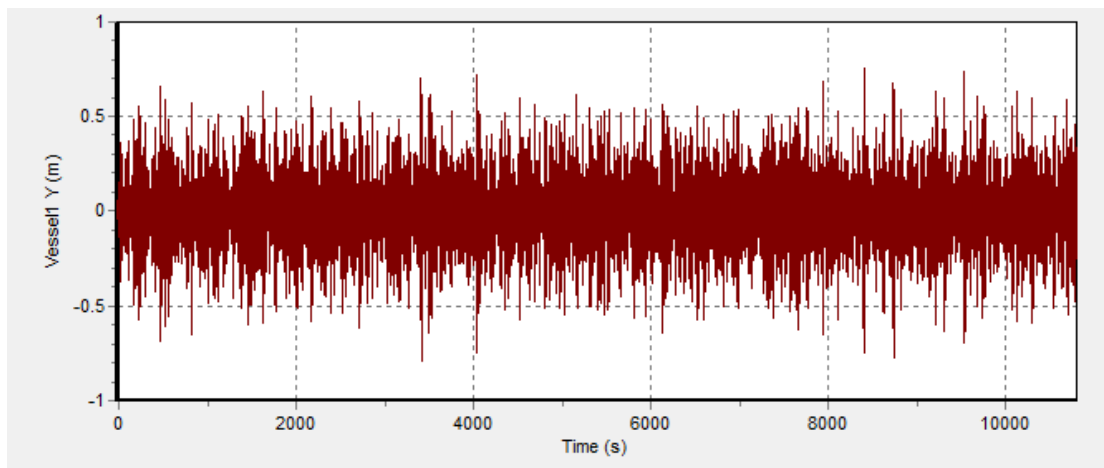
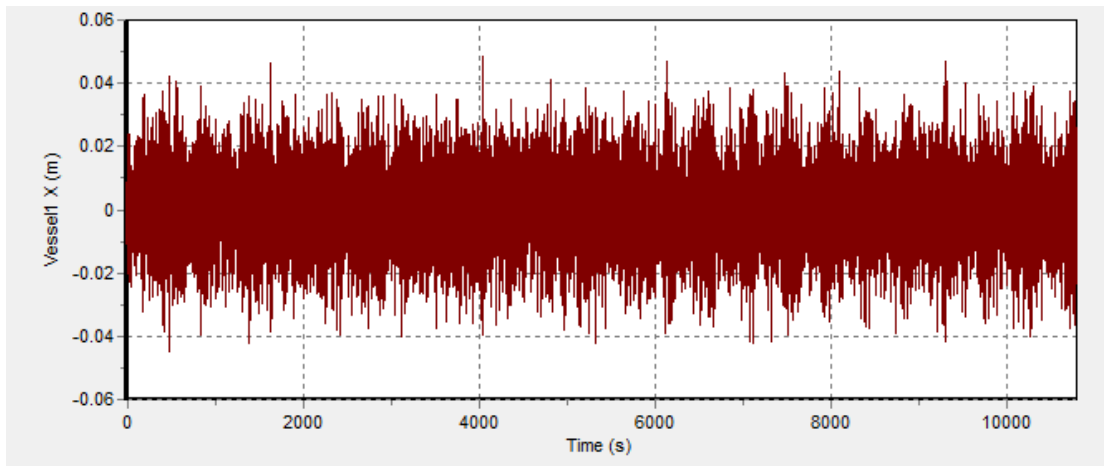


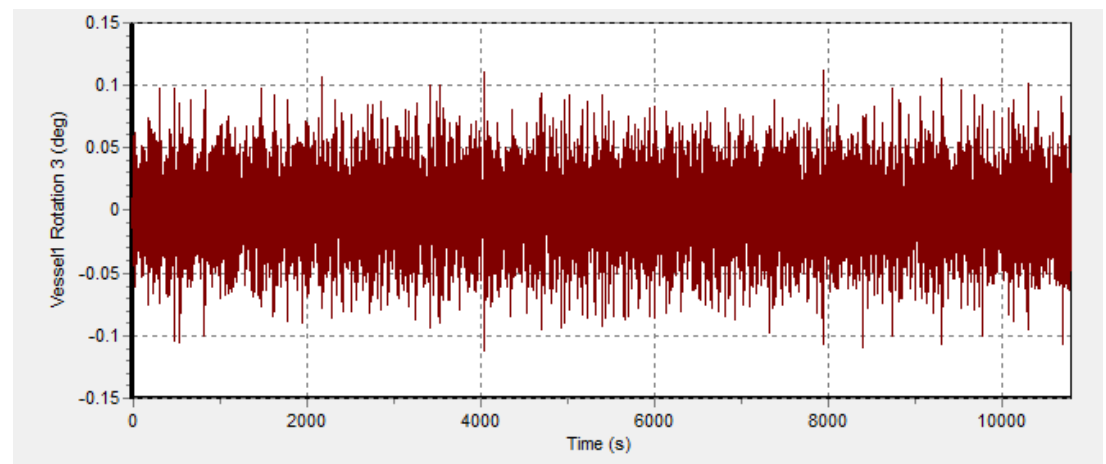
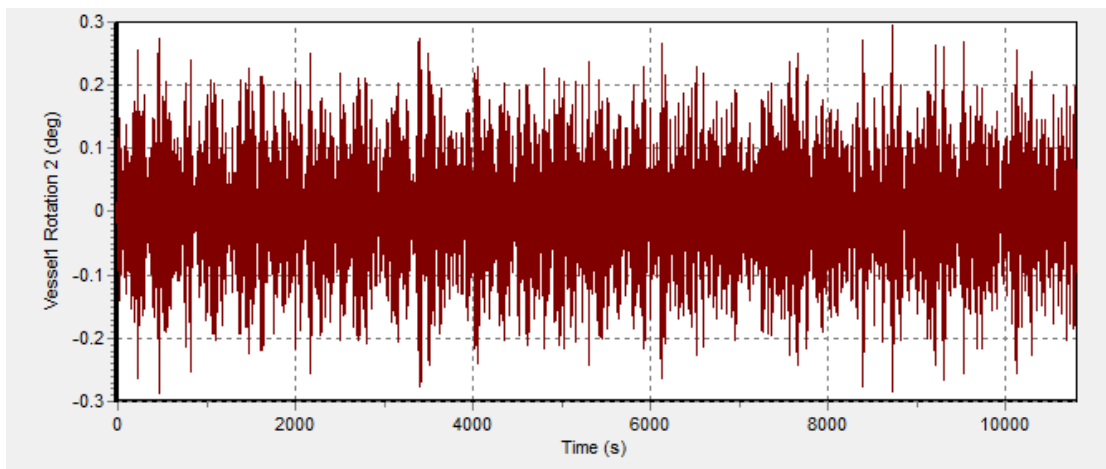
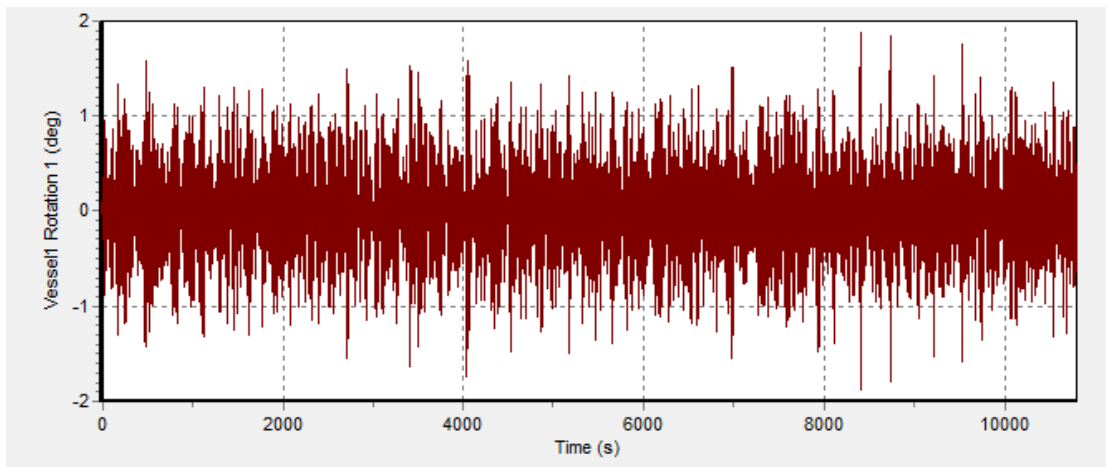
Hs = 2.3 m, Heading 90 deg.



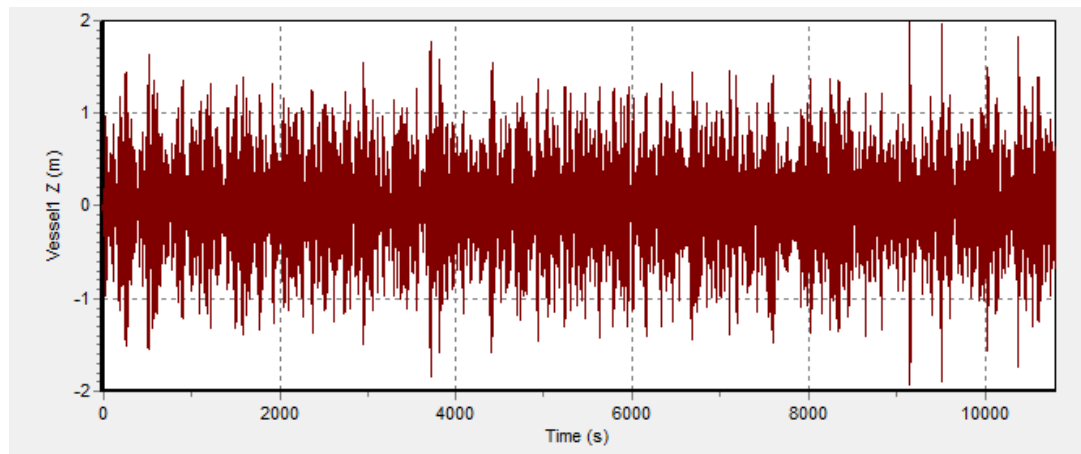
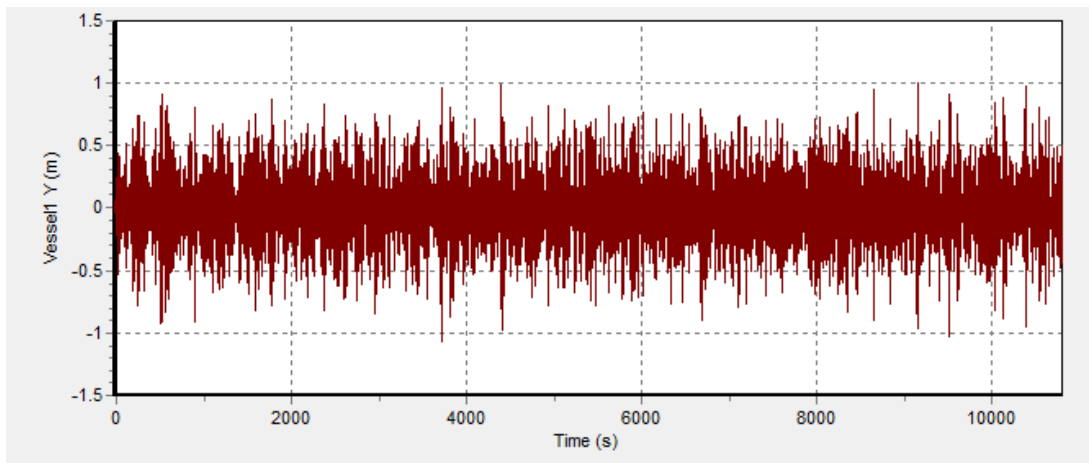
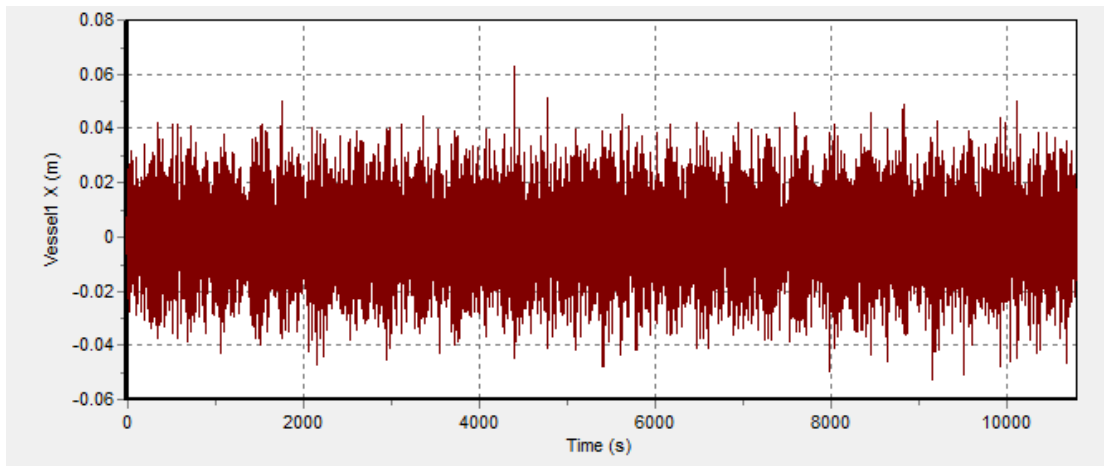


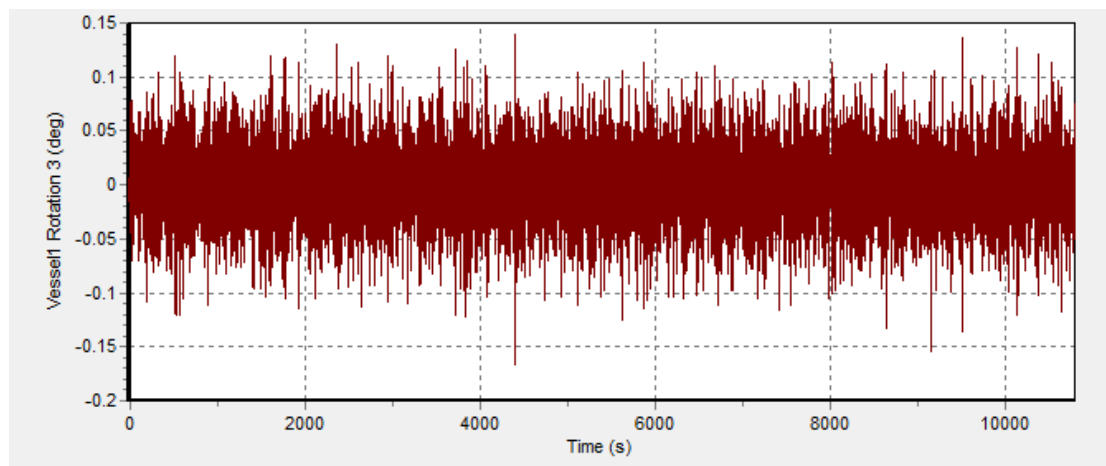
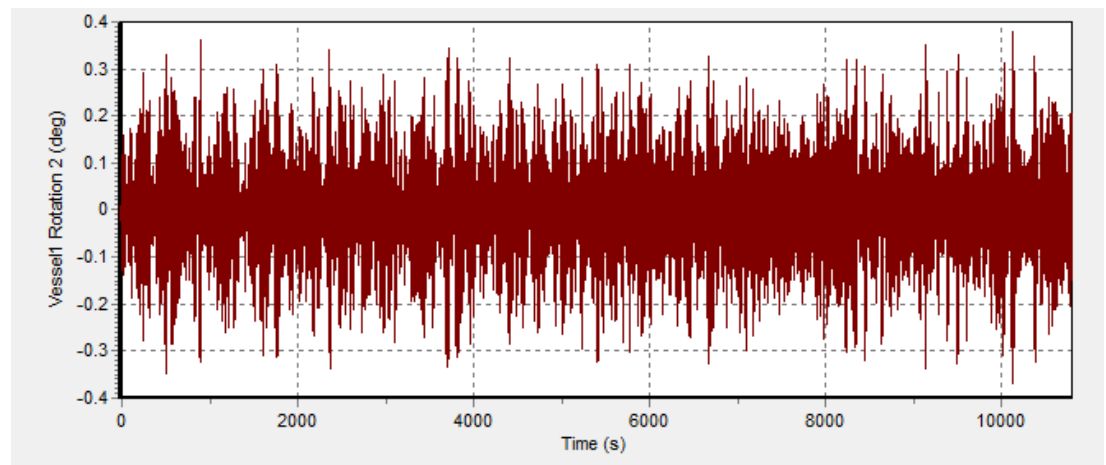
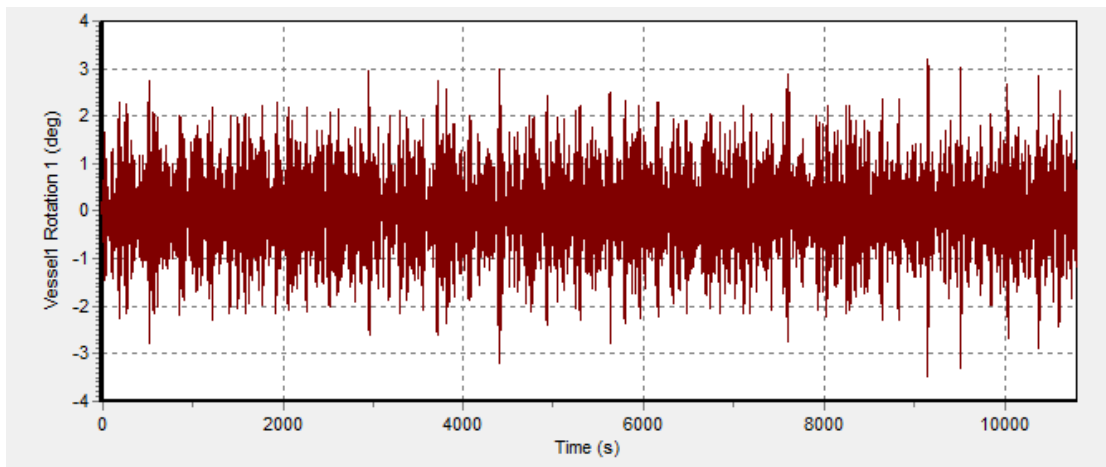
Hs = 2.8 m, Heading 90 deg.



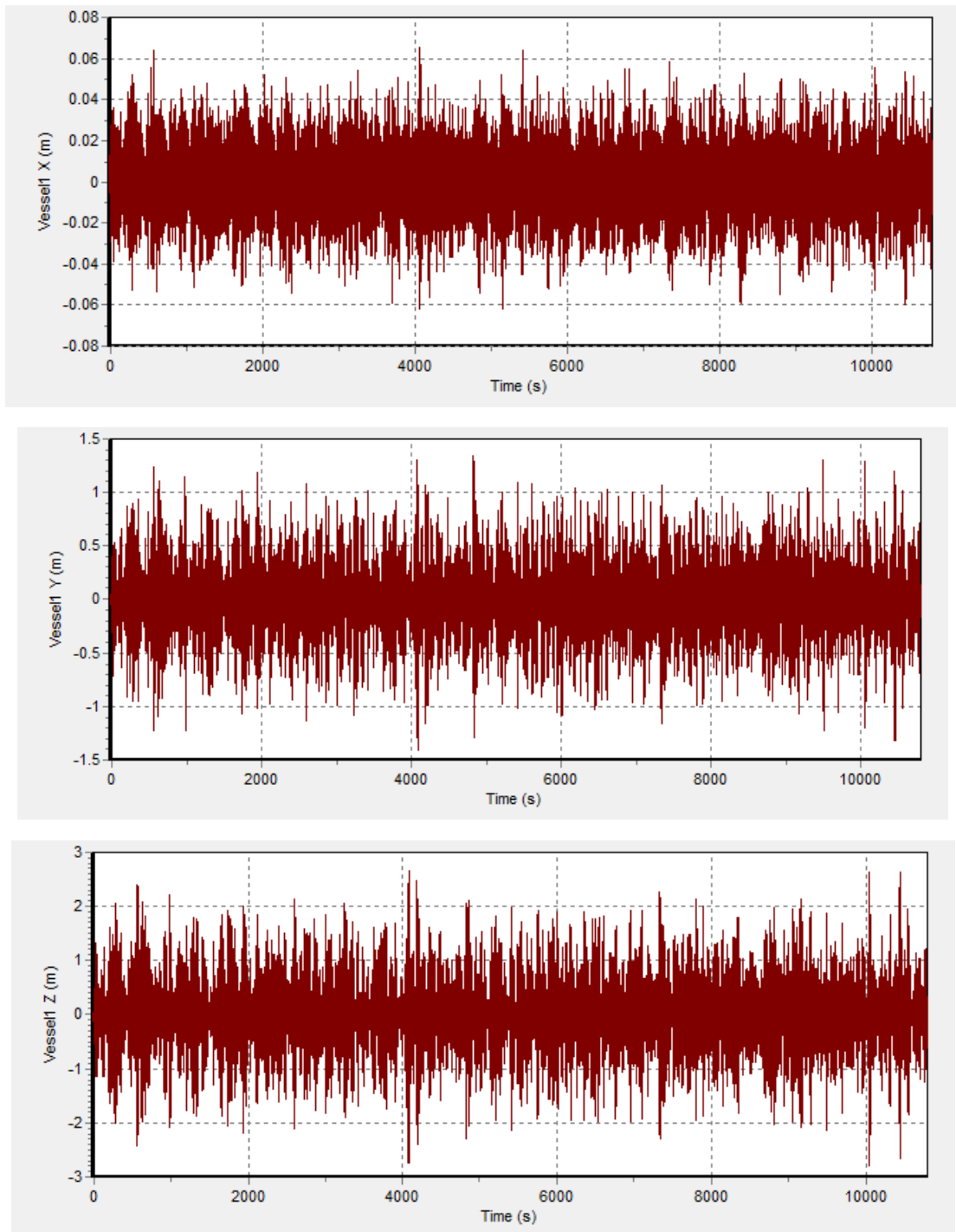


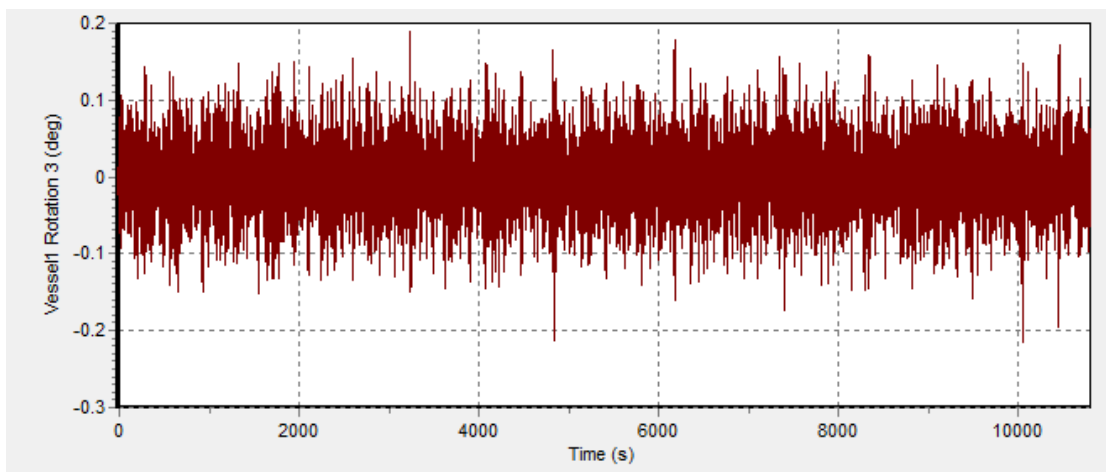
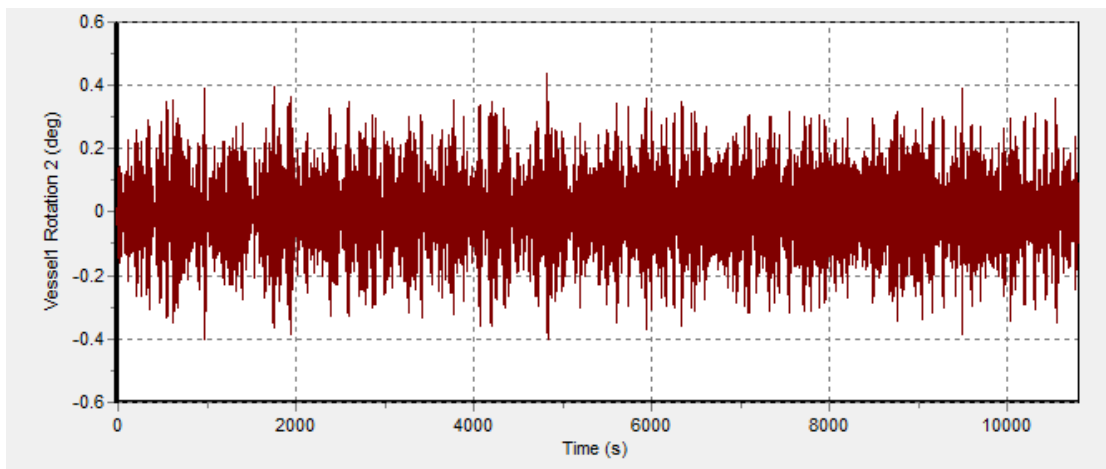
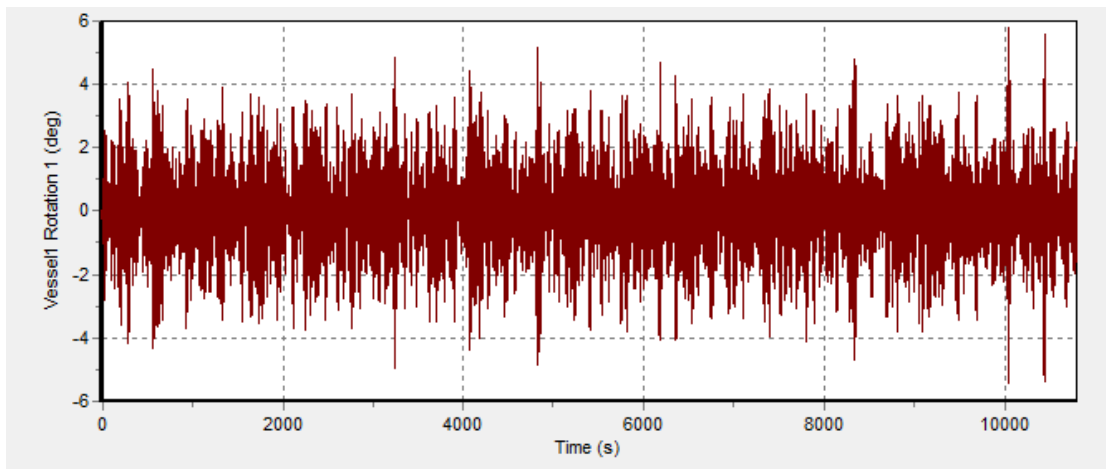
Hs = 3.3 m, Heading 90 deg.





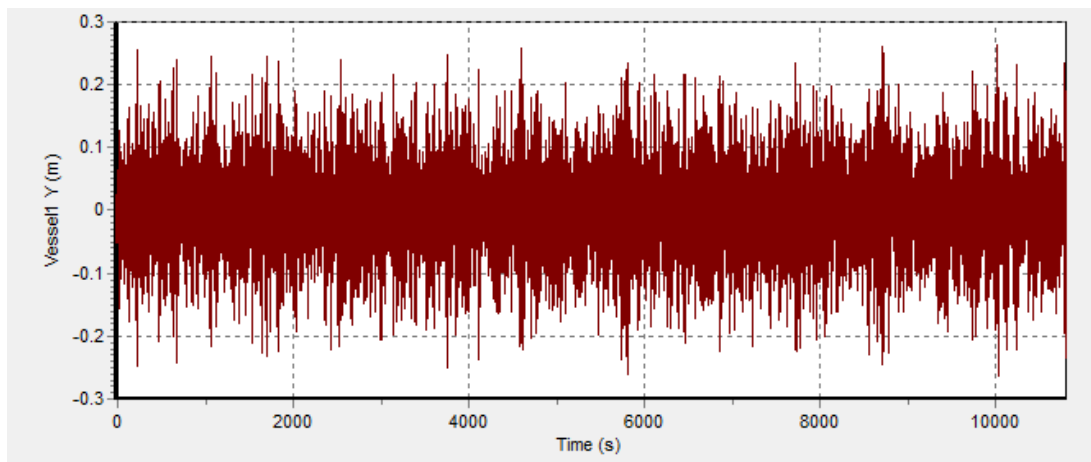
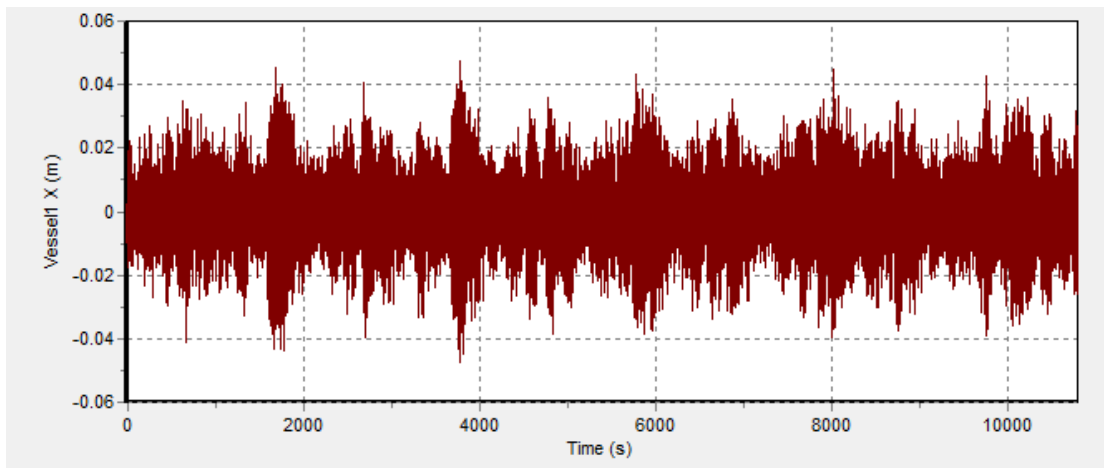
Hs = 3.8 m, Heading 90 deg.

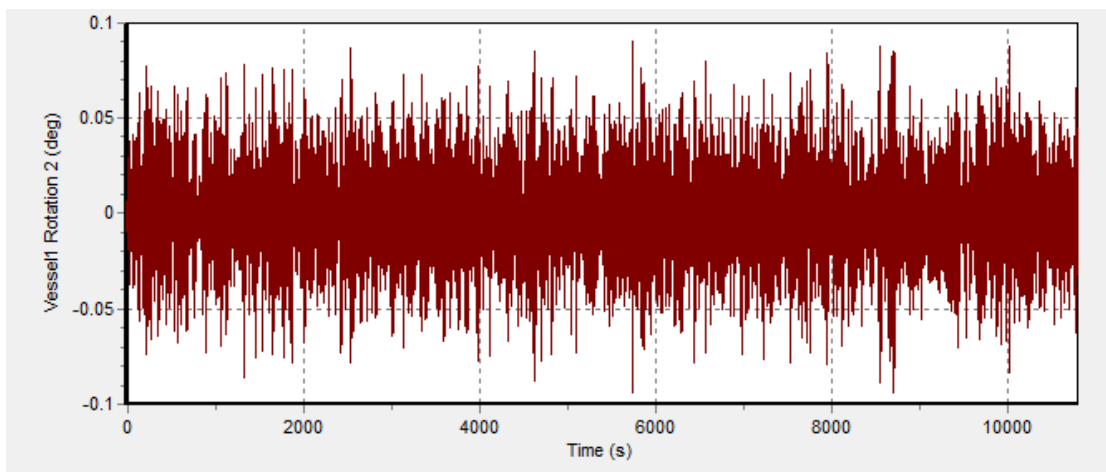
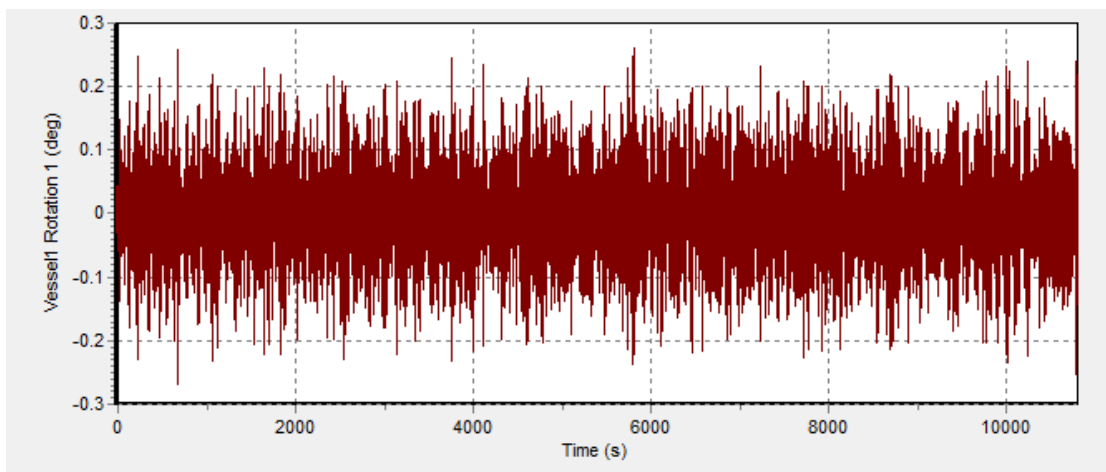
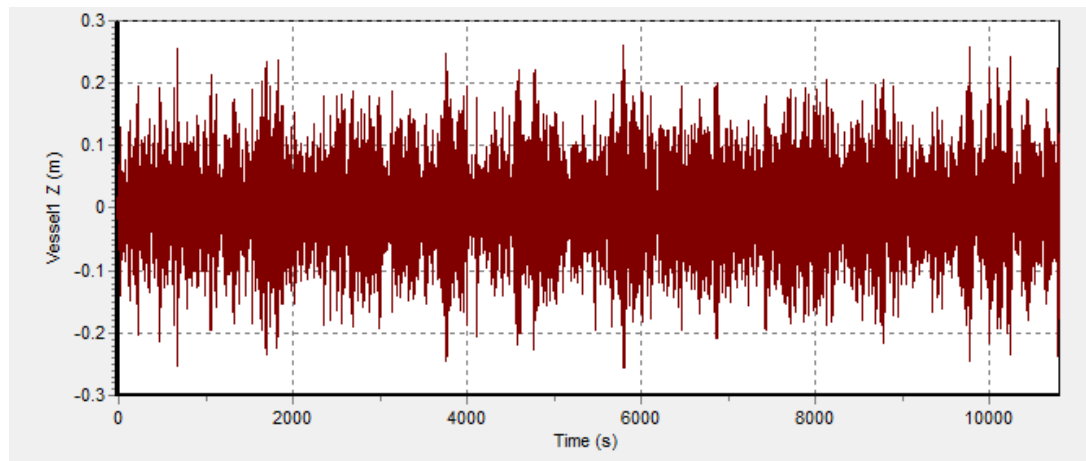


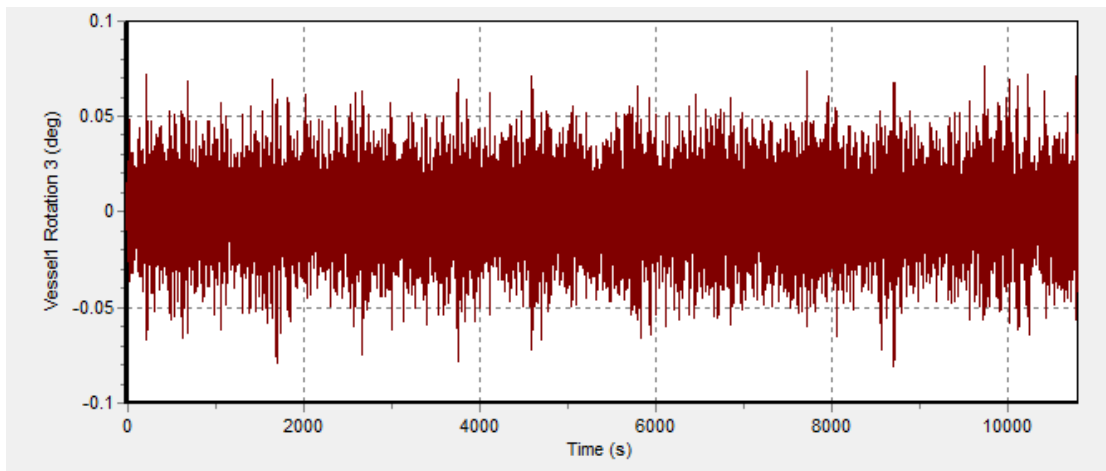


RESPONS GERAK KAPAL LOAD CASE 3

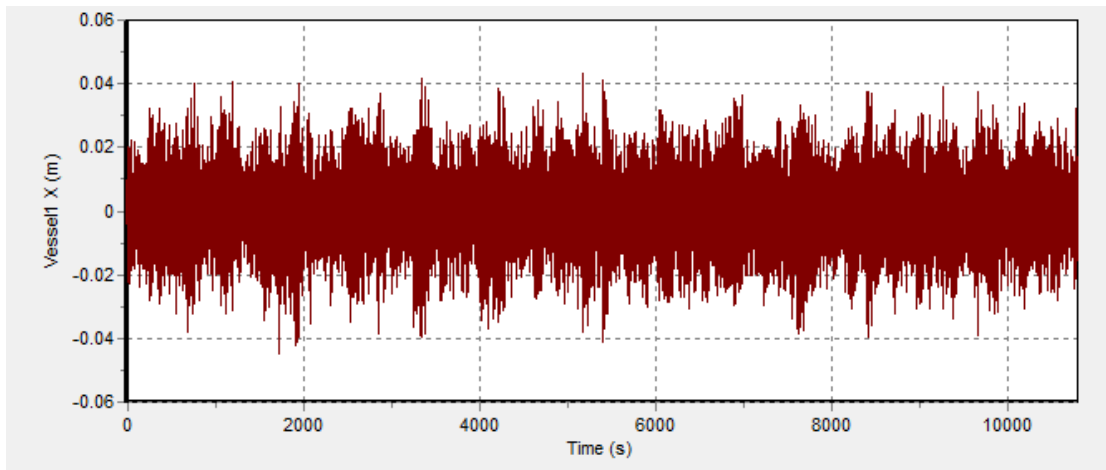
Hs = 1.8 m, Heading 90 deg.

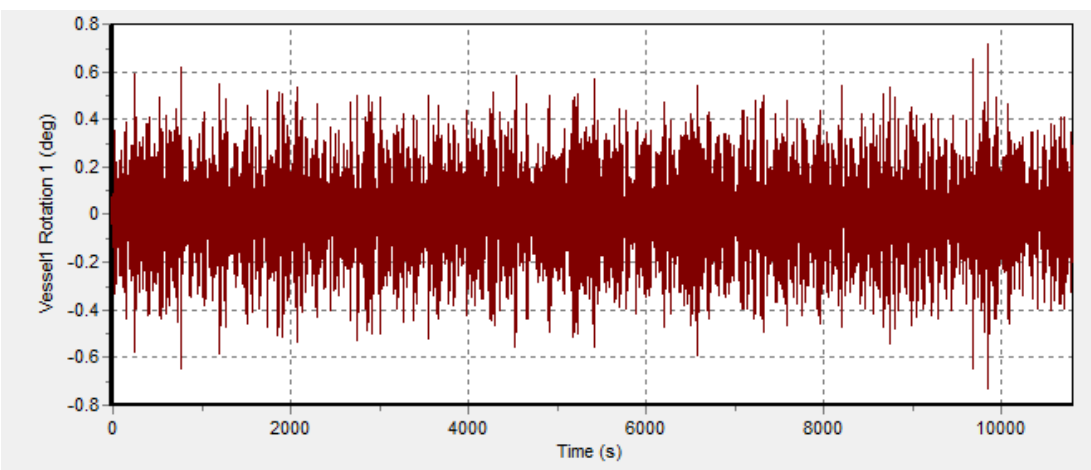
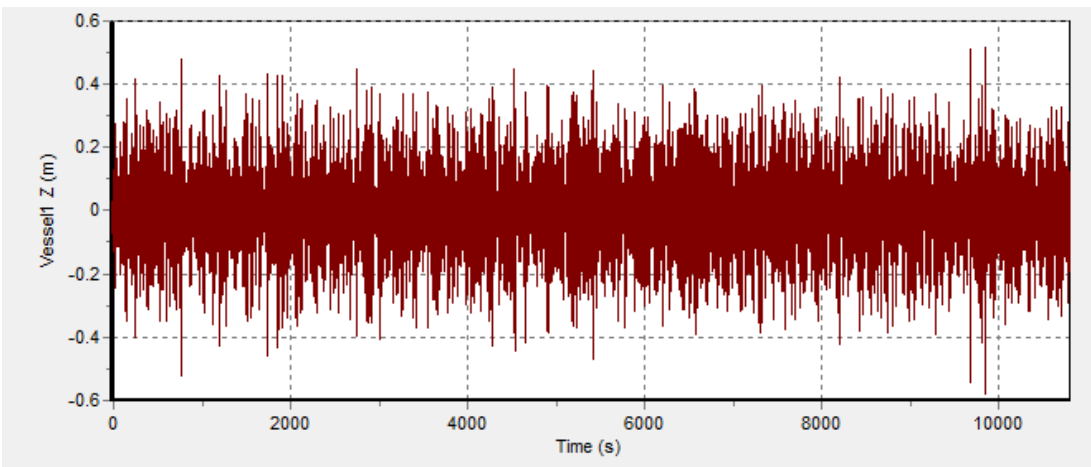
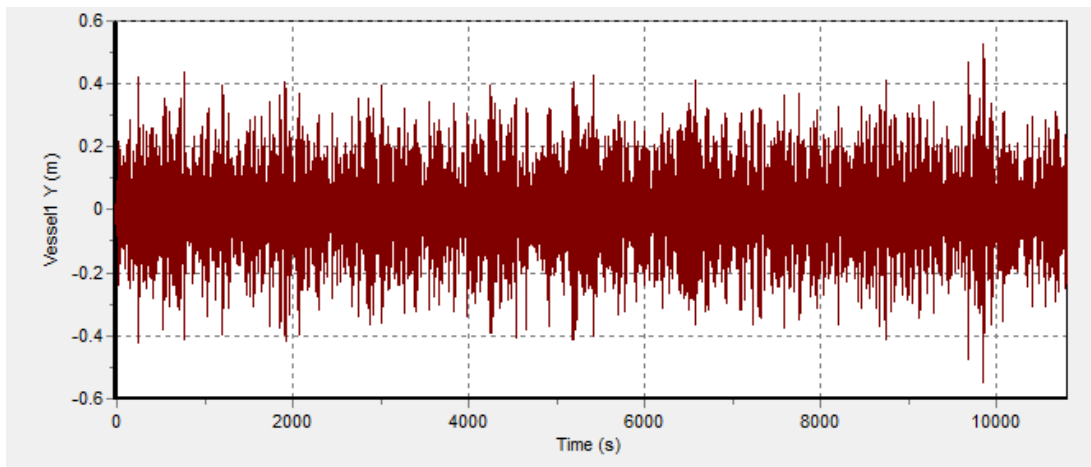


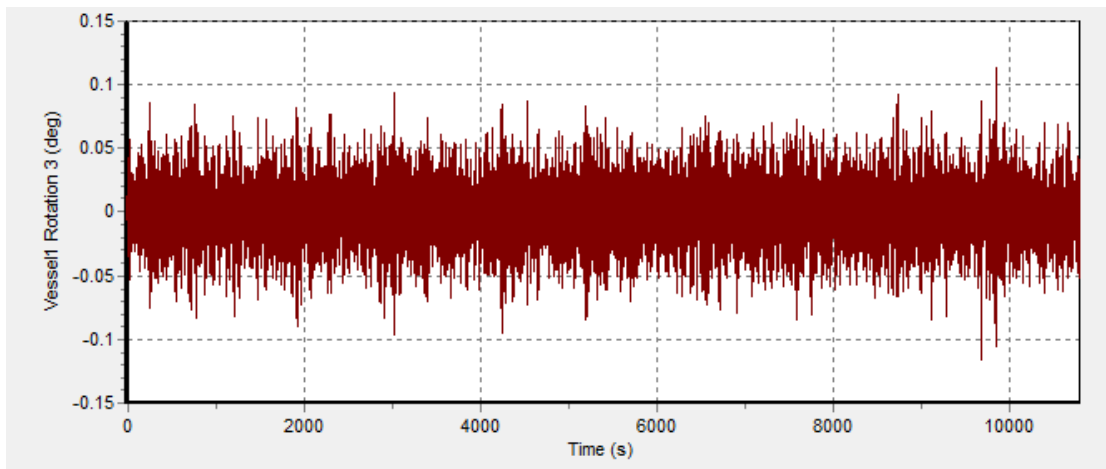
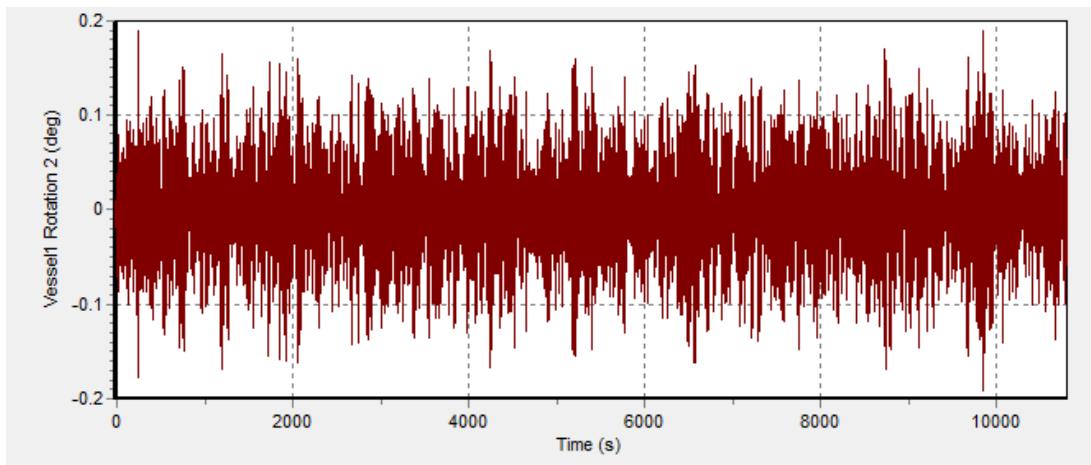




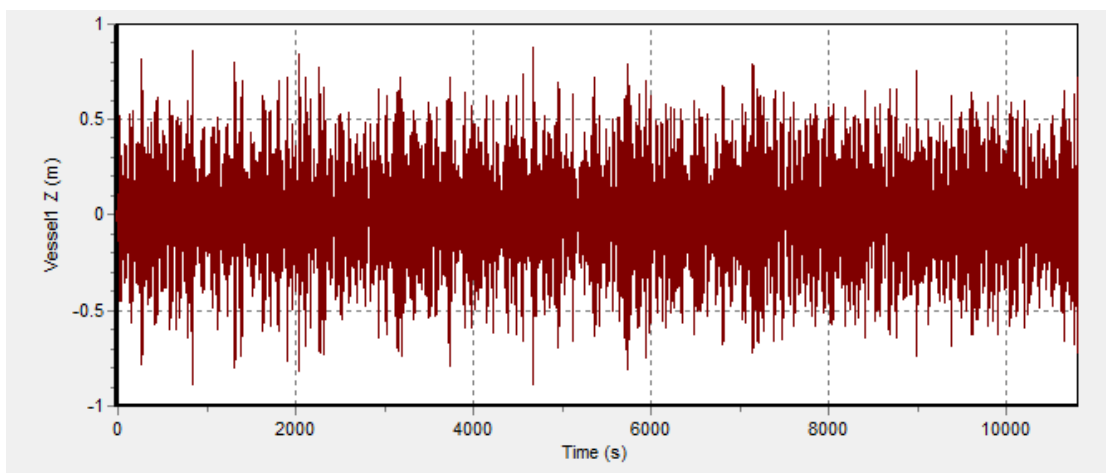
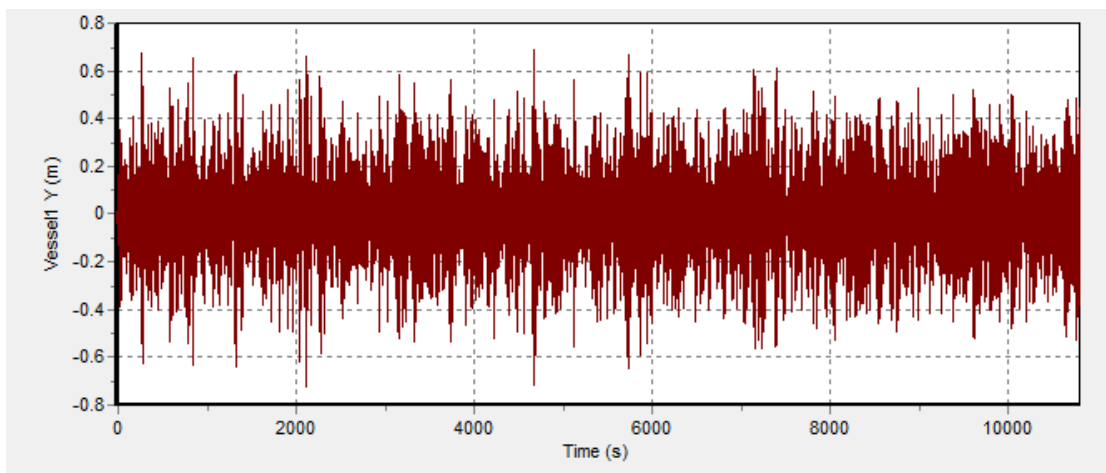
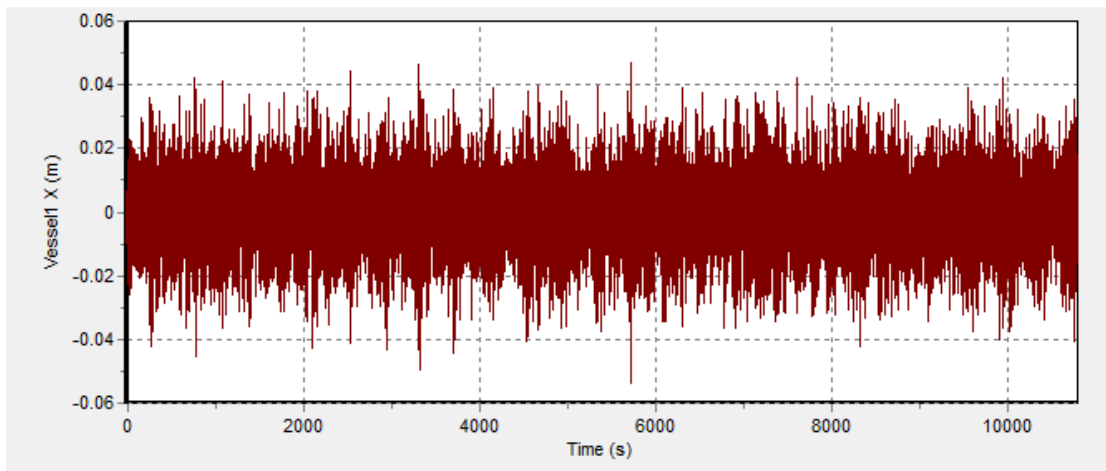
Hs = 2.3 m, Heading 90 deg.

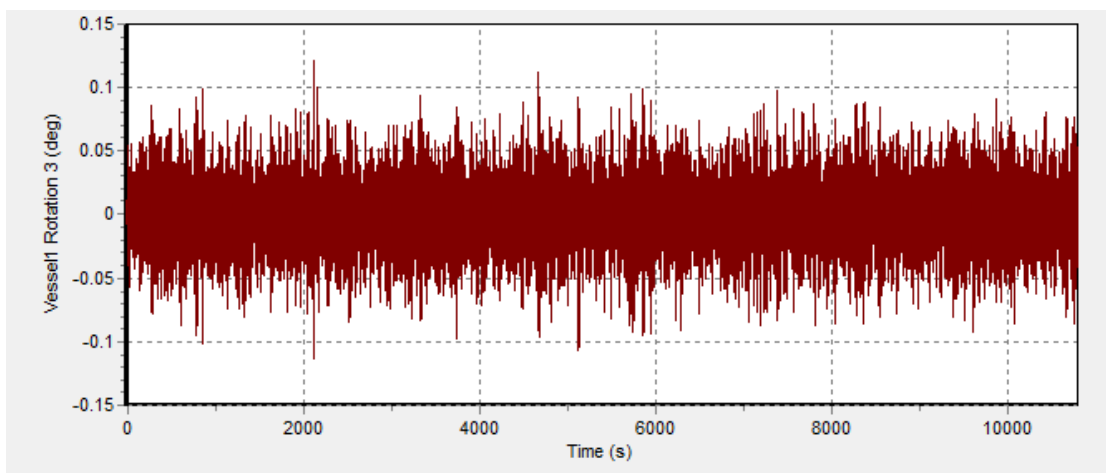
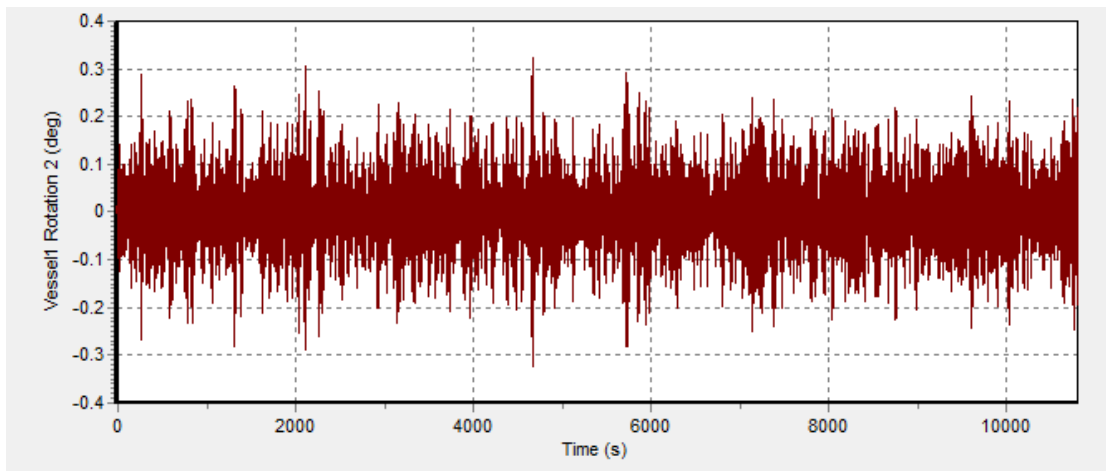
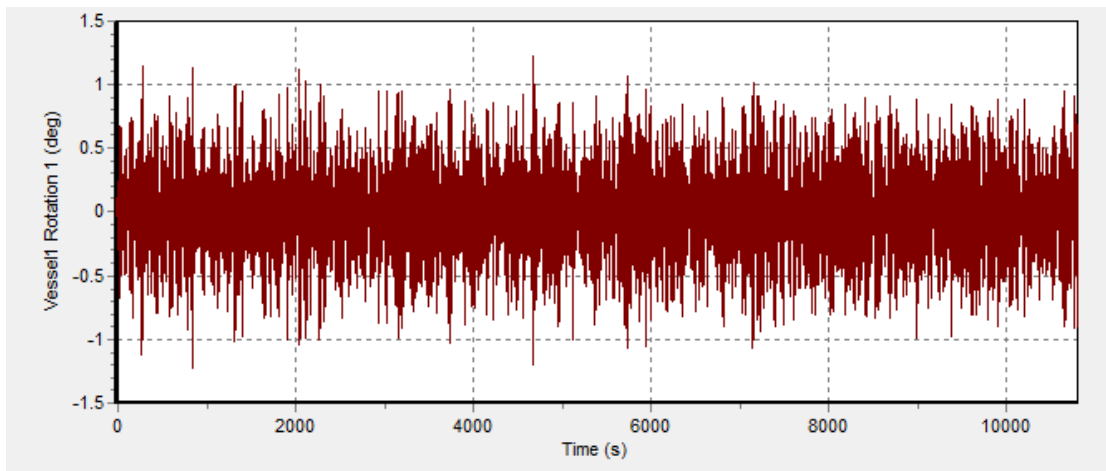




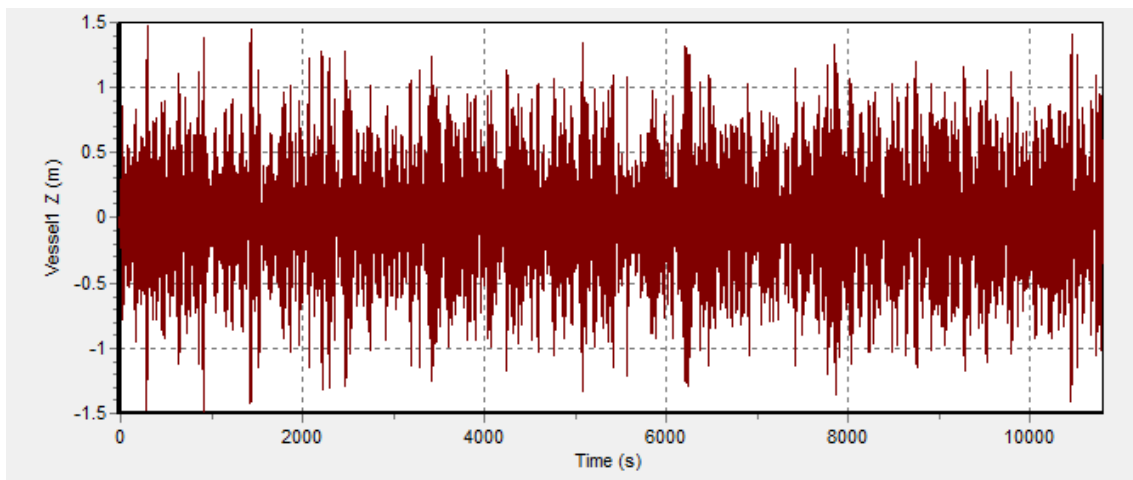
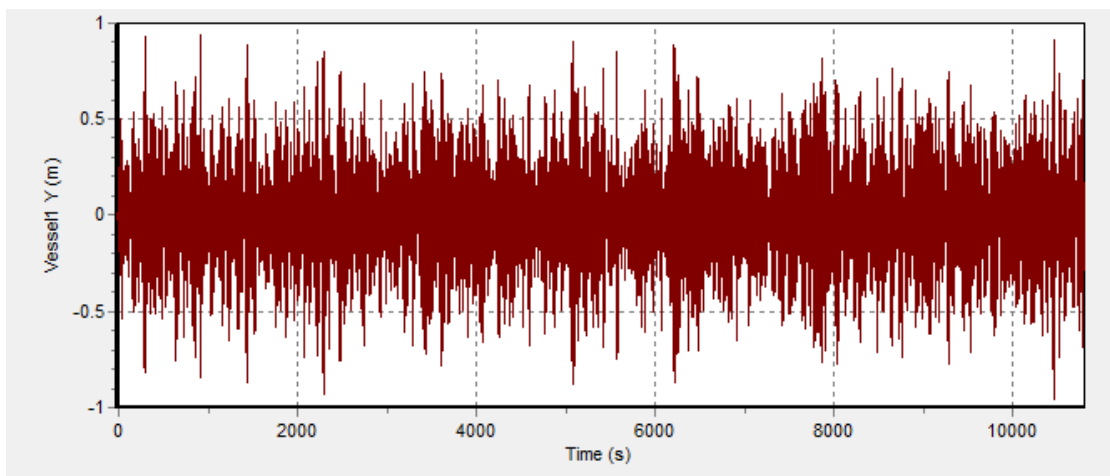
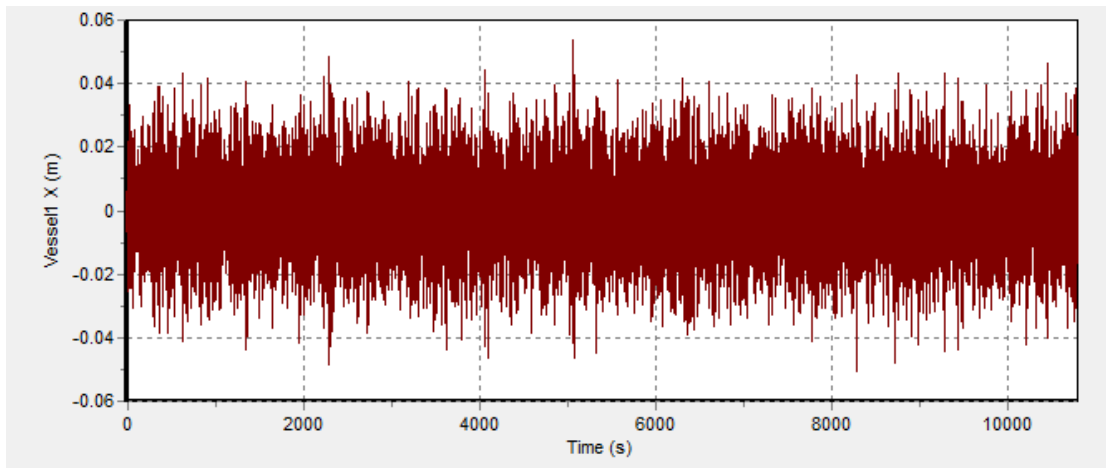


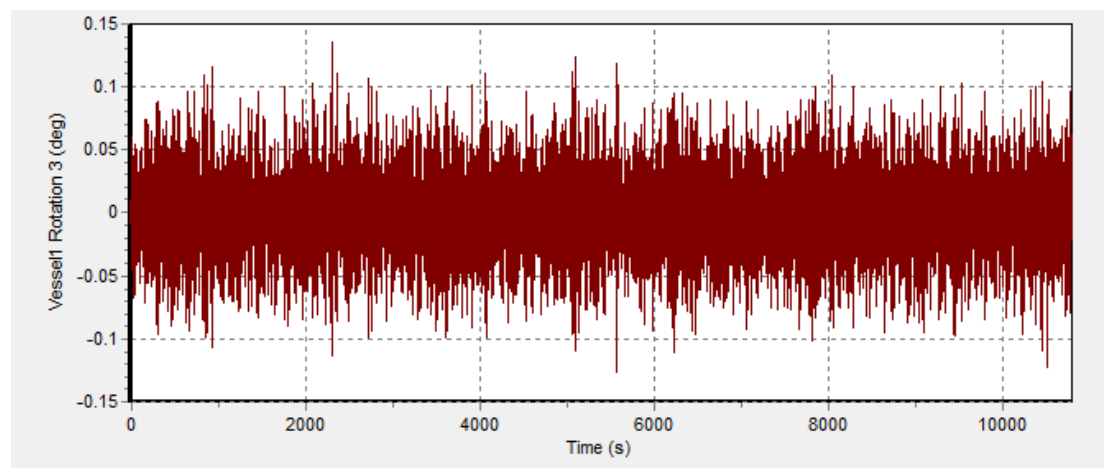
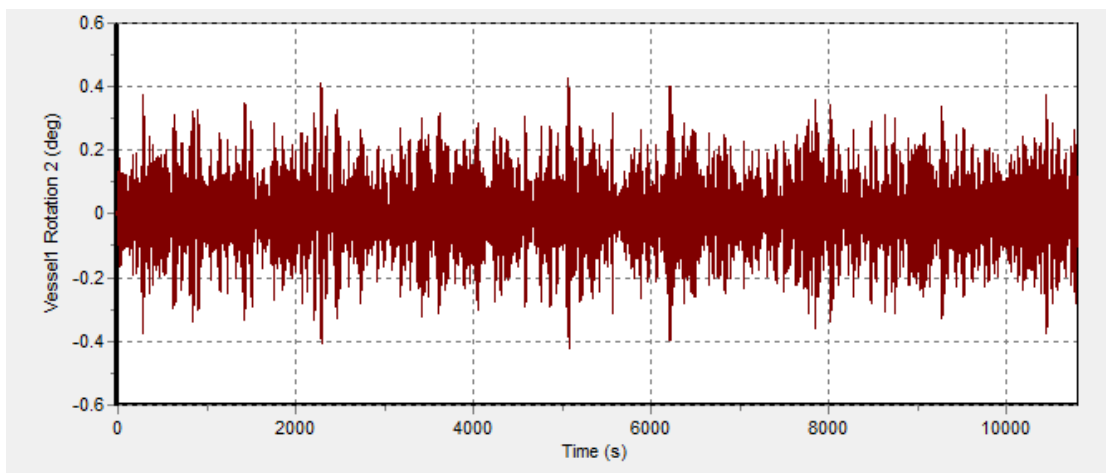
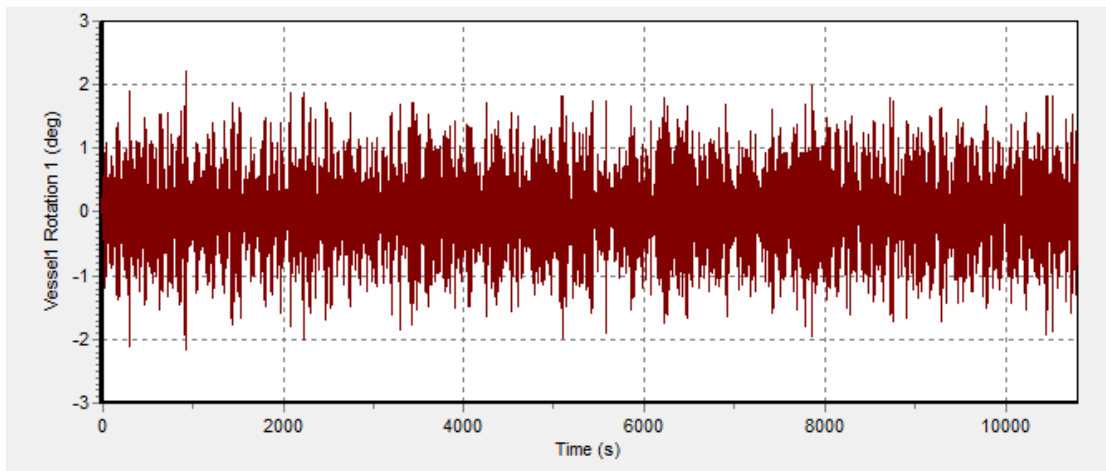
Hs = 2.8 m, Heading 90 deg.



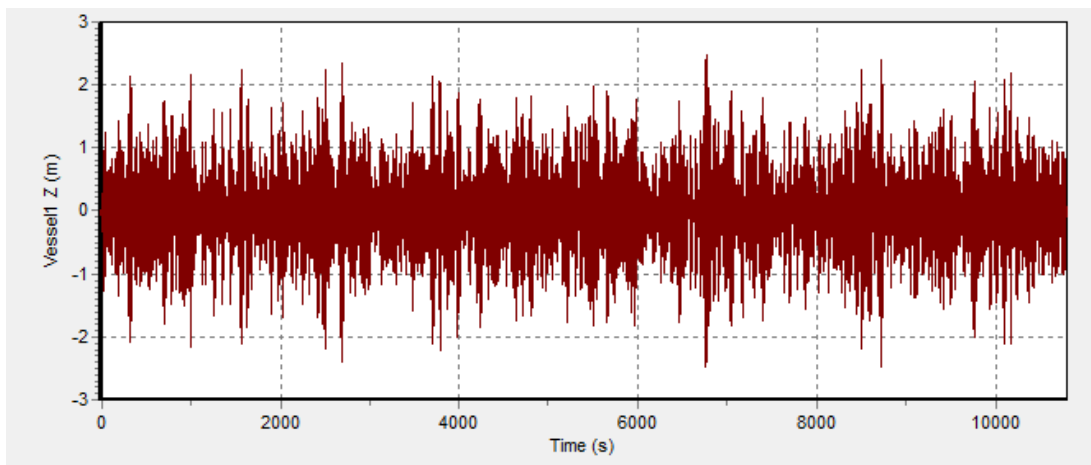
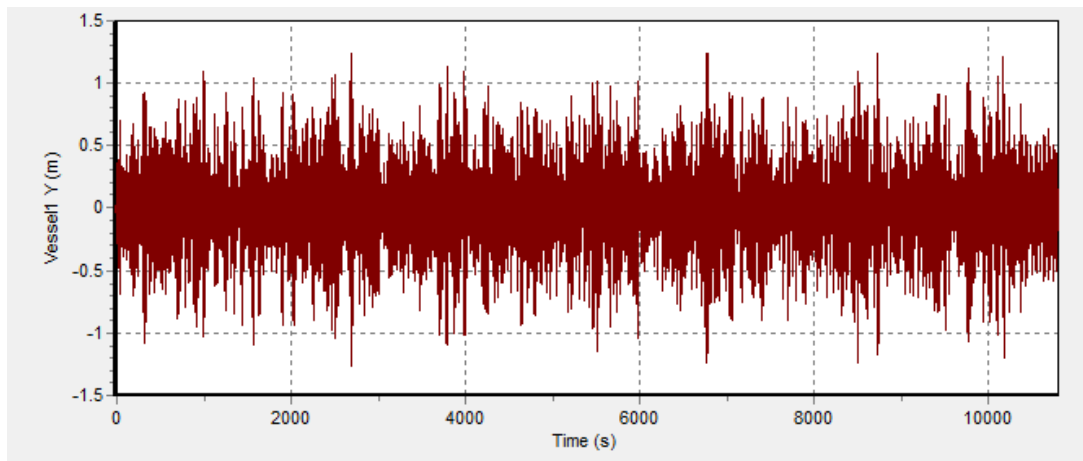
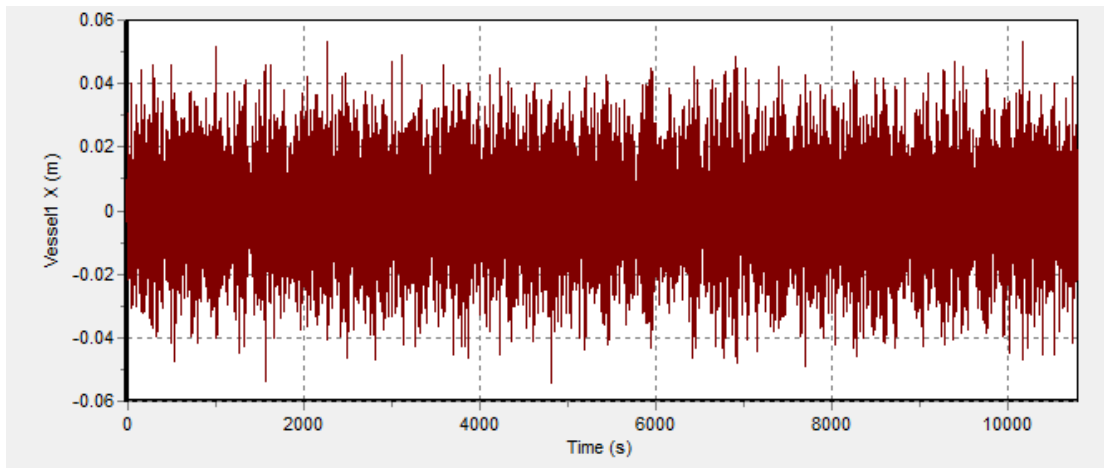


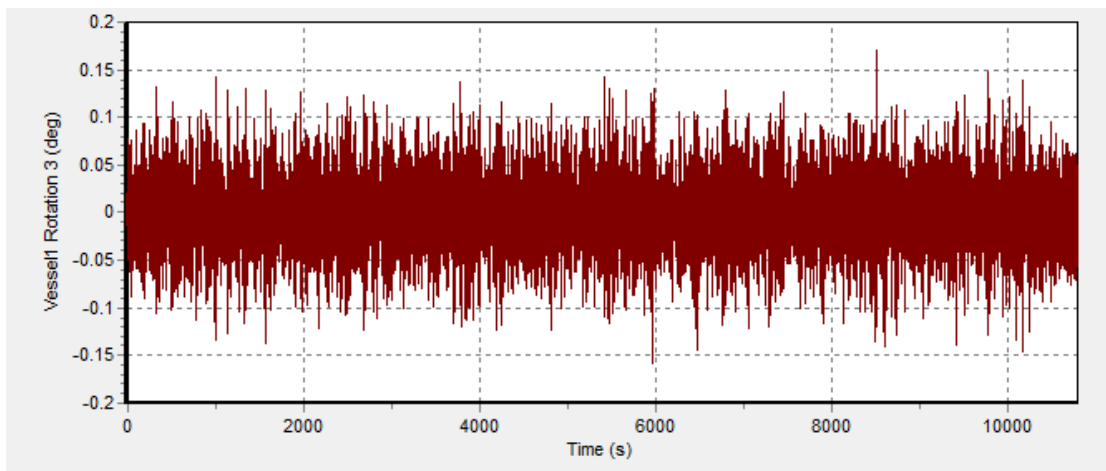
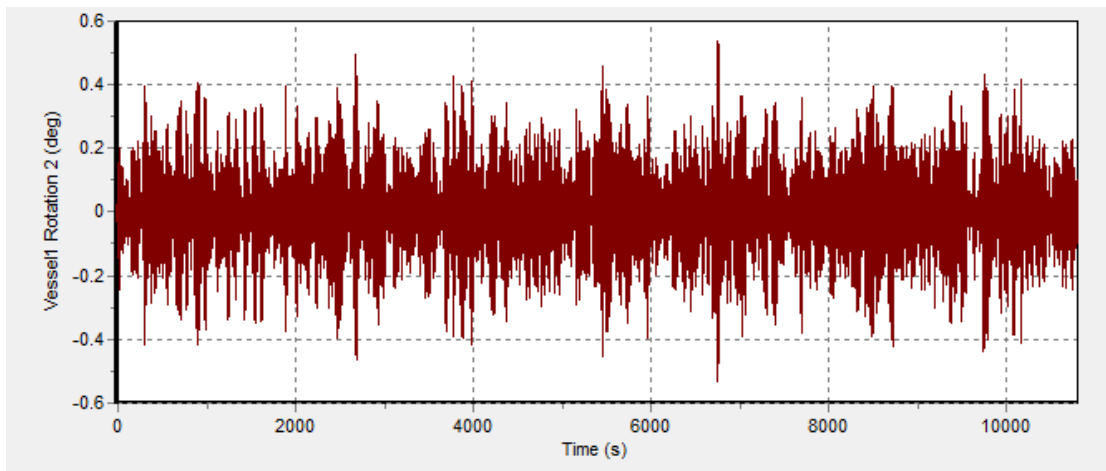
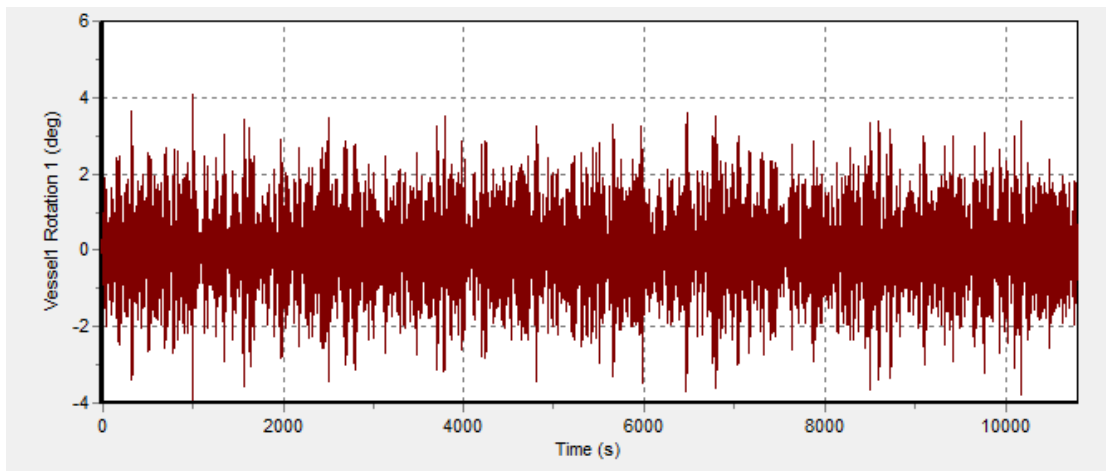
Hs = 3.3 m, Heading 90 deg.





Hs = 3.8 m, Heading 90 deg.



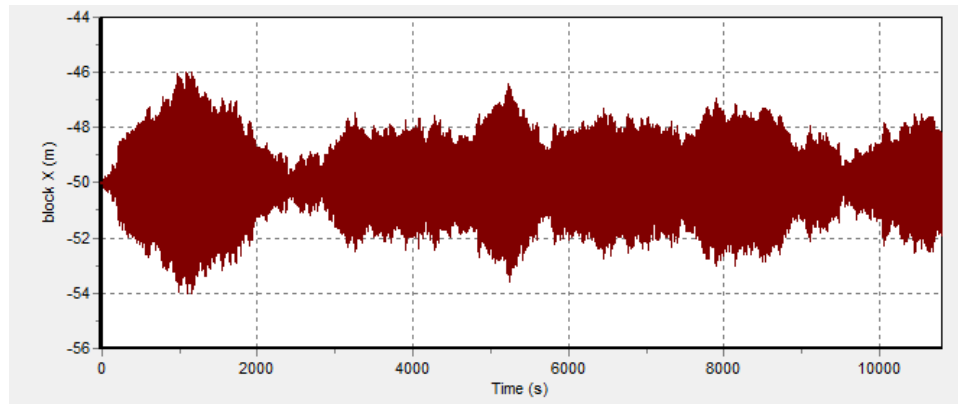


LAMPIRAN II
RESPONS GERAK
SUBSEA MANIFOLD

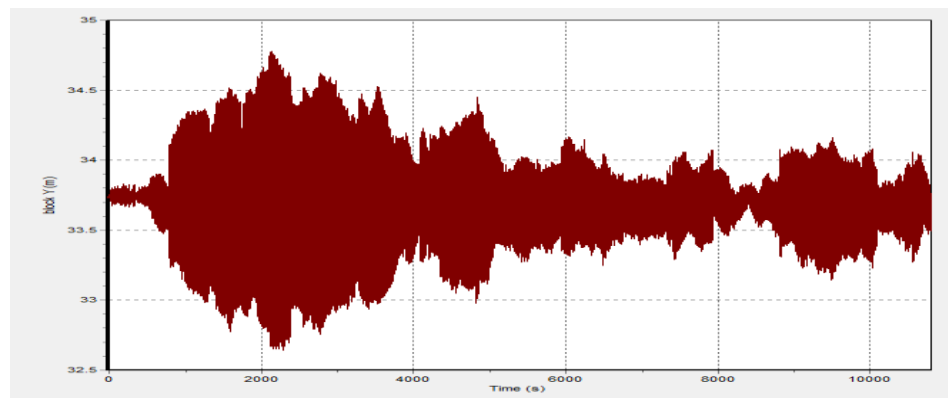
RESPONS GERAK STRUKTUR

$H_s = 3.8$ m, LOAD CASE 1

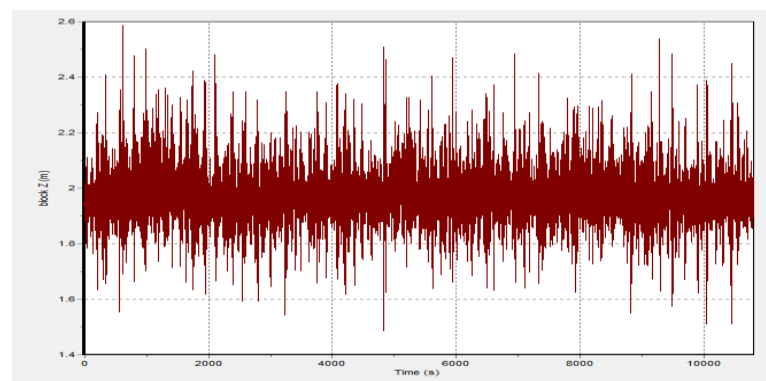
0 deg, Sumbu X



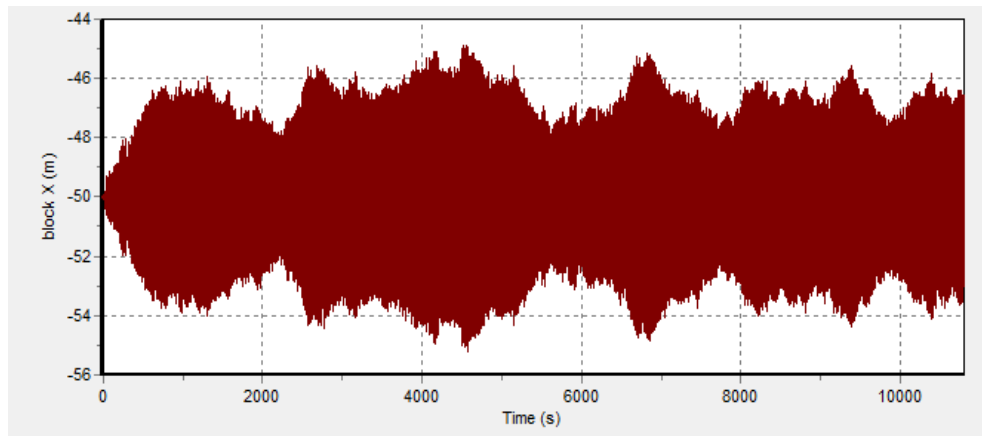
0 deg, Sumbu Y



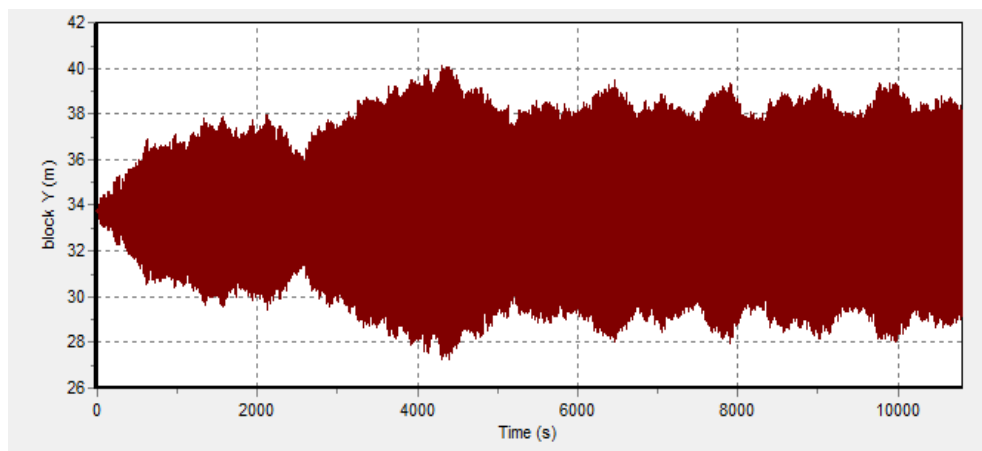
0 deg, Sumbu Z



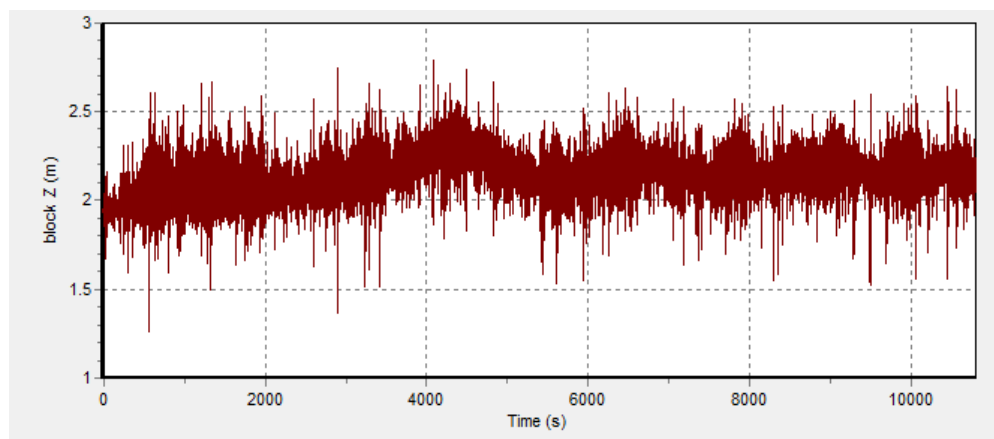
45 deg, Sumbu X



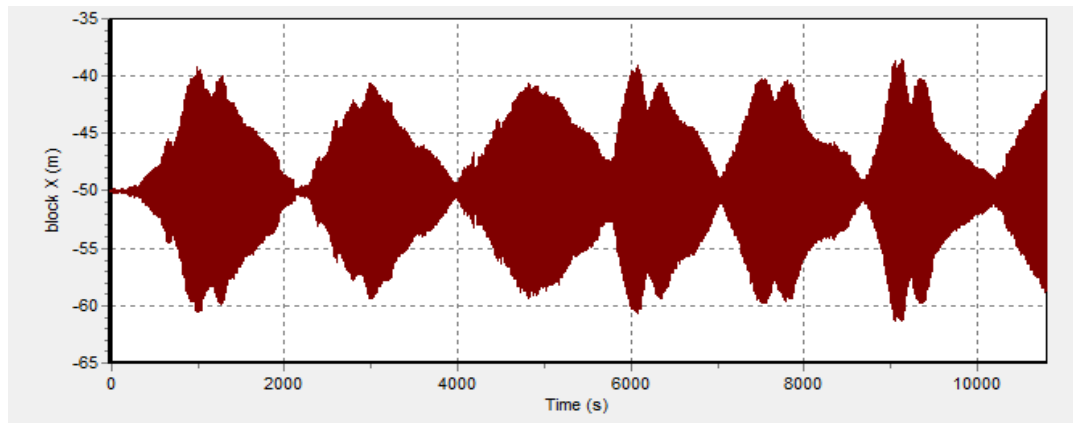
45 deg, Sumbu Y



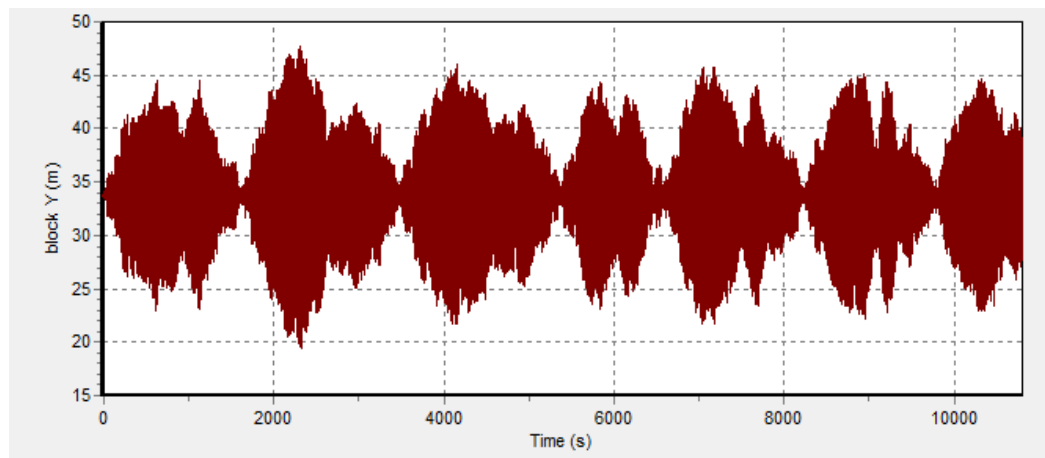
45 deg, Sumbu Z



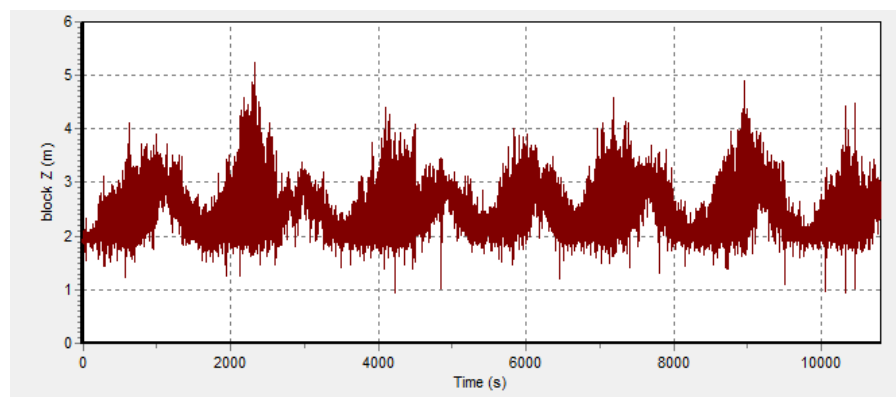
90 deg, Sumbu X



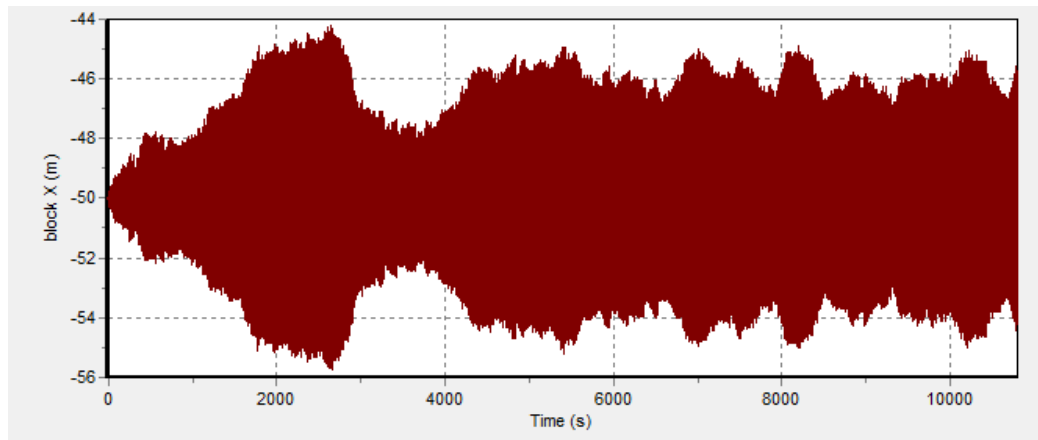
90 deg, Sumbu Y



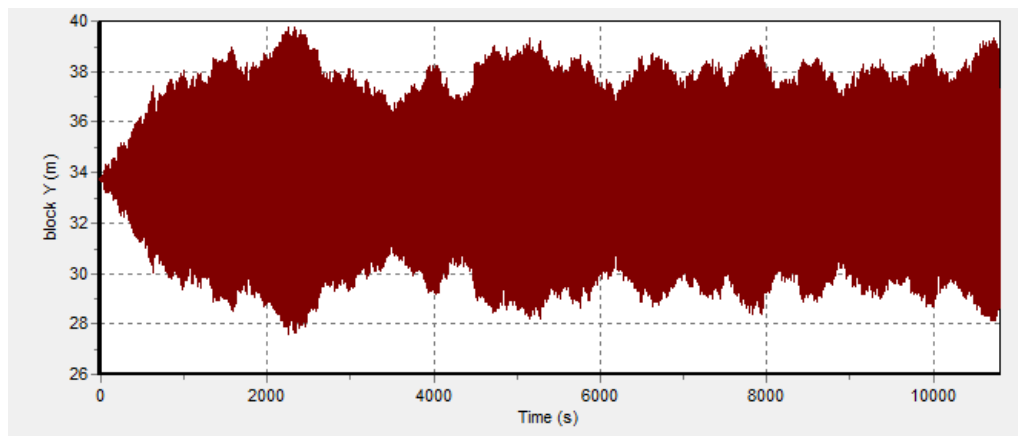
90 deg, Sumbu Z



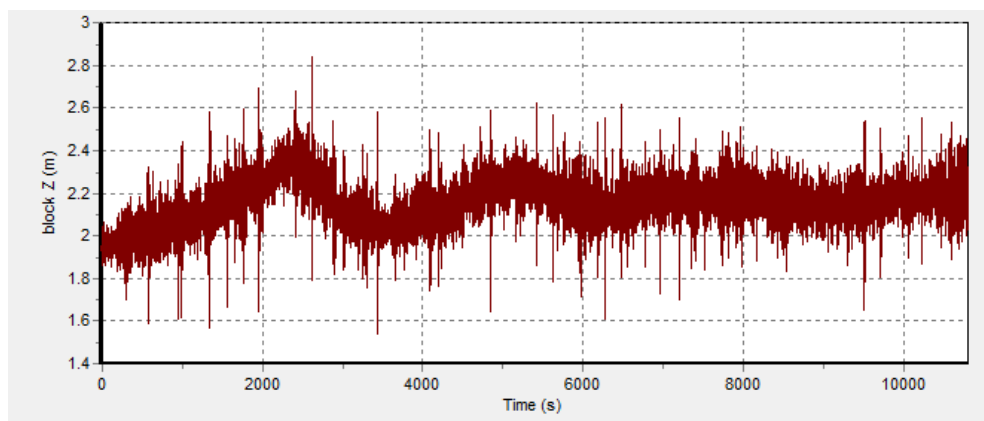
135 deg, Sumbu X



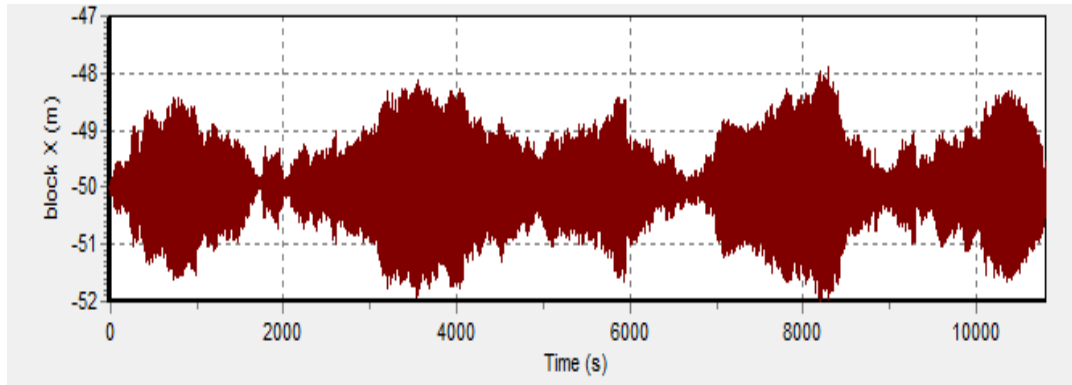
135 deg, Sumbu Y



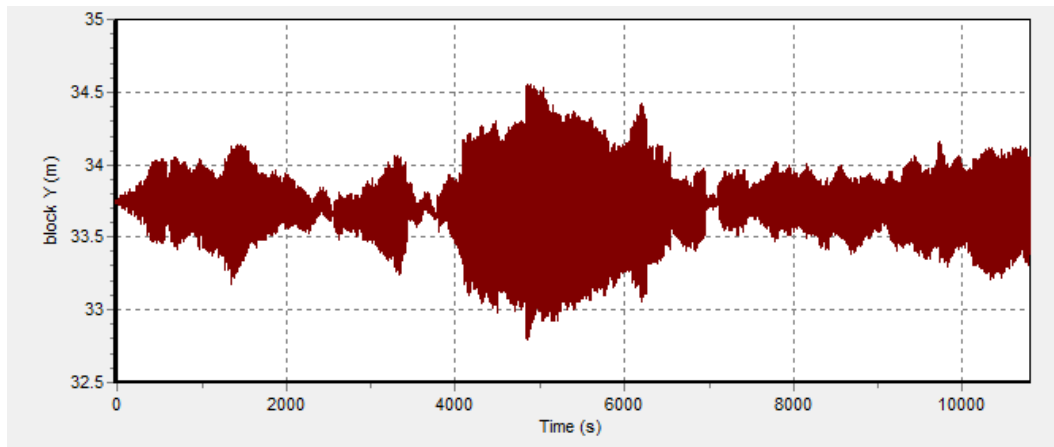
135 deg, Sumbu Z



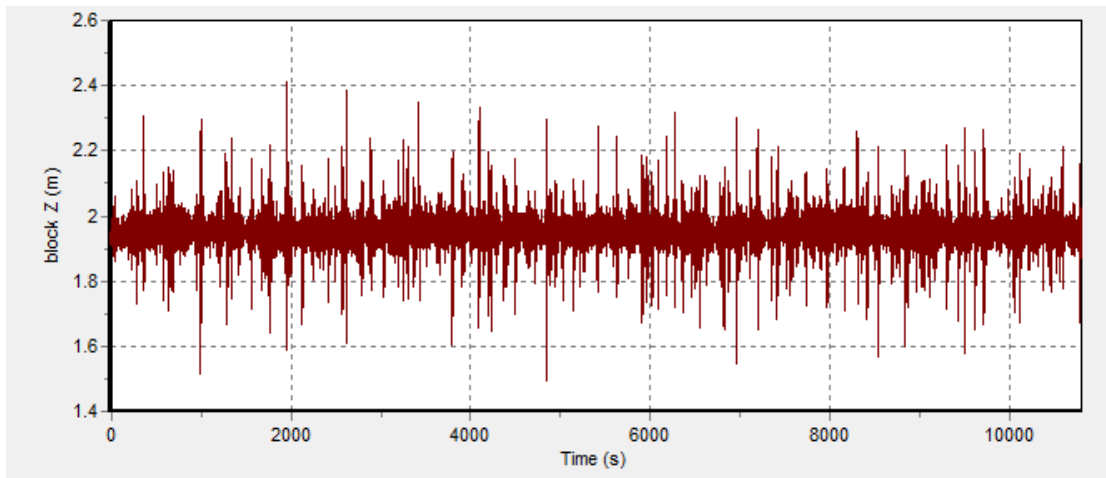
180 deg, Sumbu X



180 deg, Sumbu Y



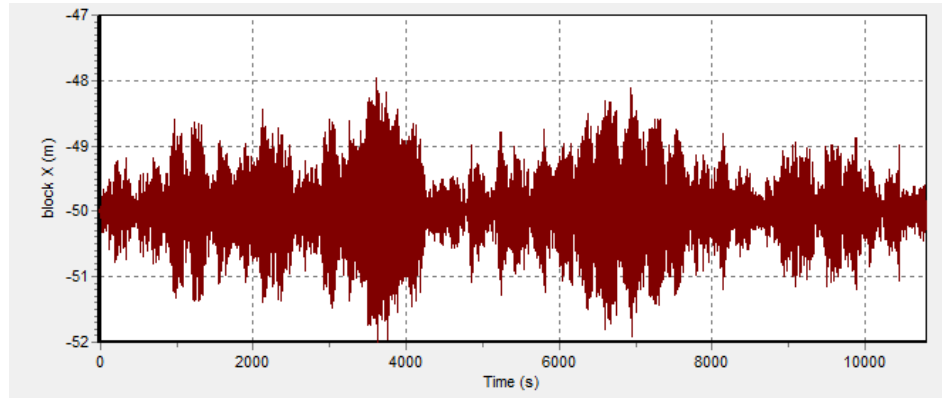
180 deg, Sumbu Z



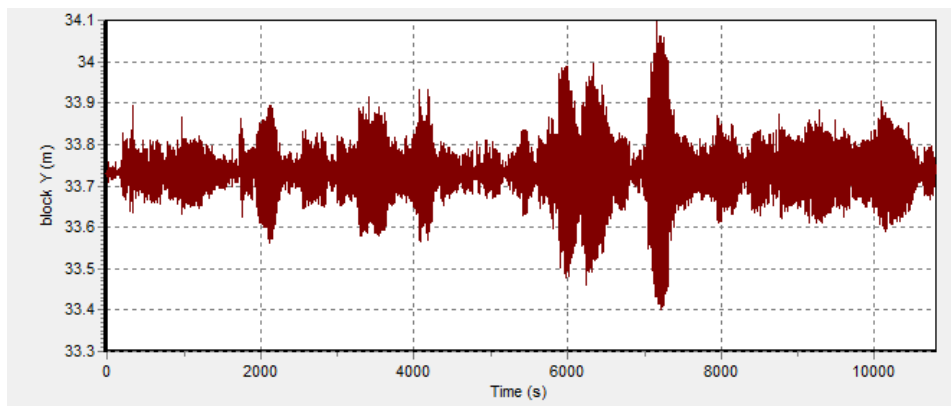
RESPONS GERAK STRUKTUR

$H_s = 3.8$ m, LOAD CASE 2

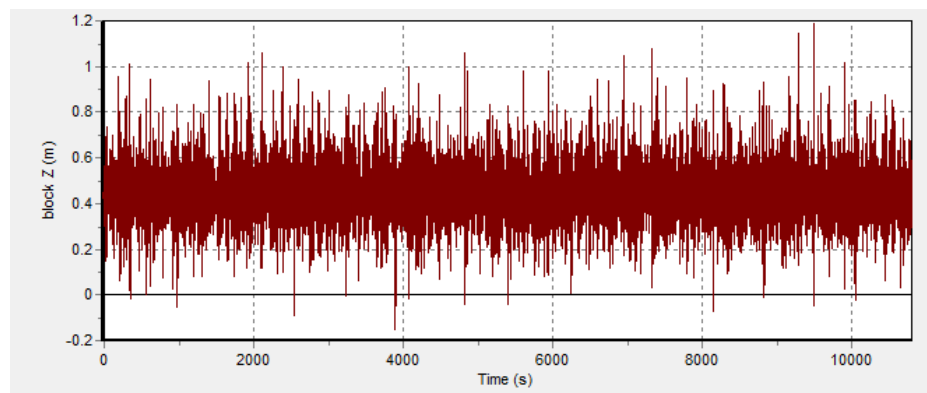
0 deg, Sumbu X



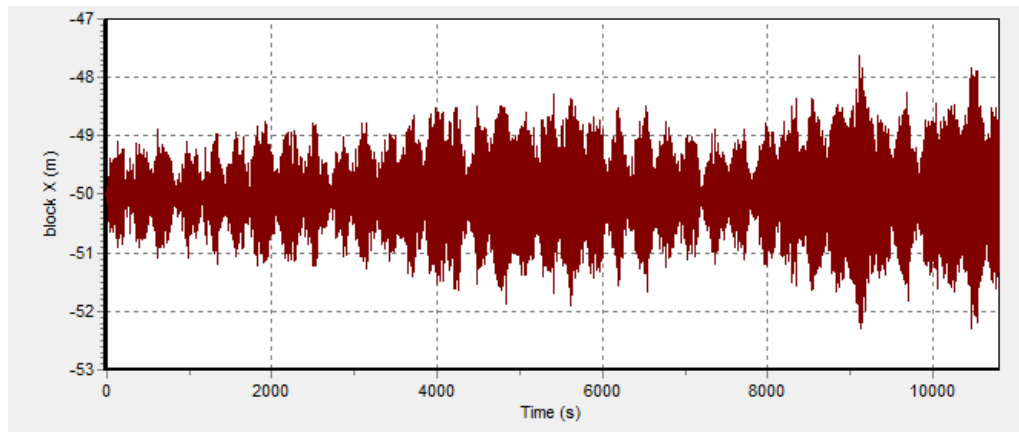
0 deg, Sumbu Y



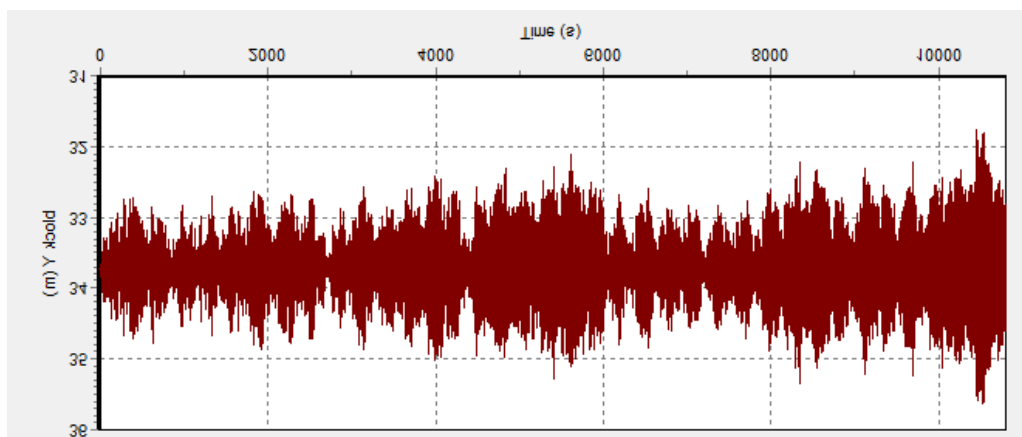
0 deg, Sumbu Z



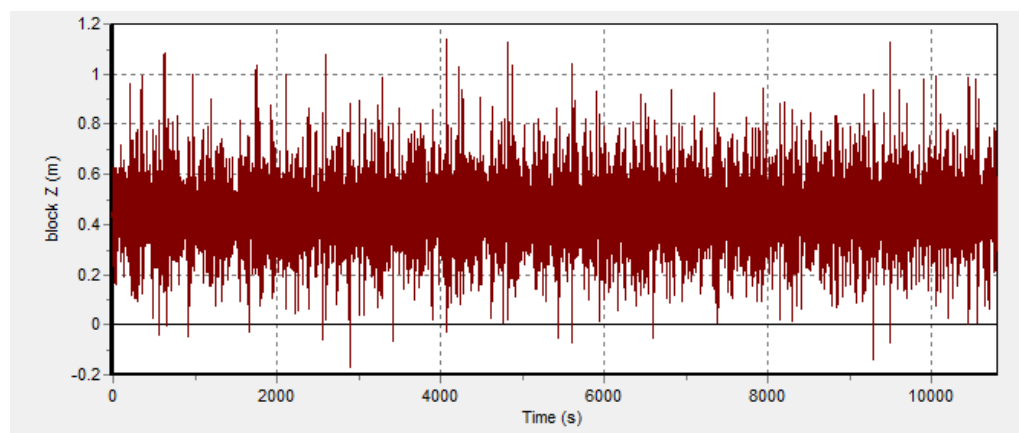
45 deg, Sumbu X



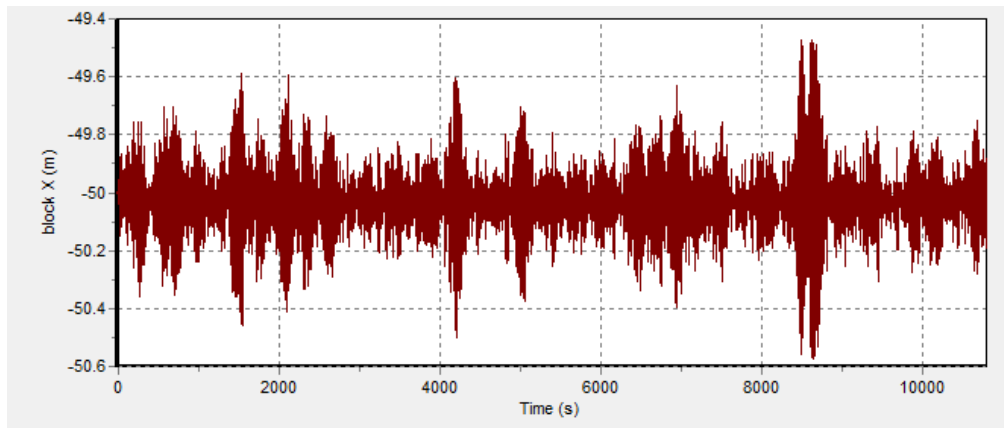
45 deg, Sumbu Y



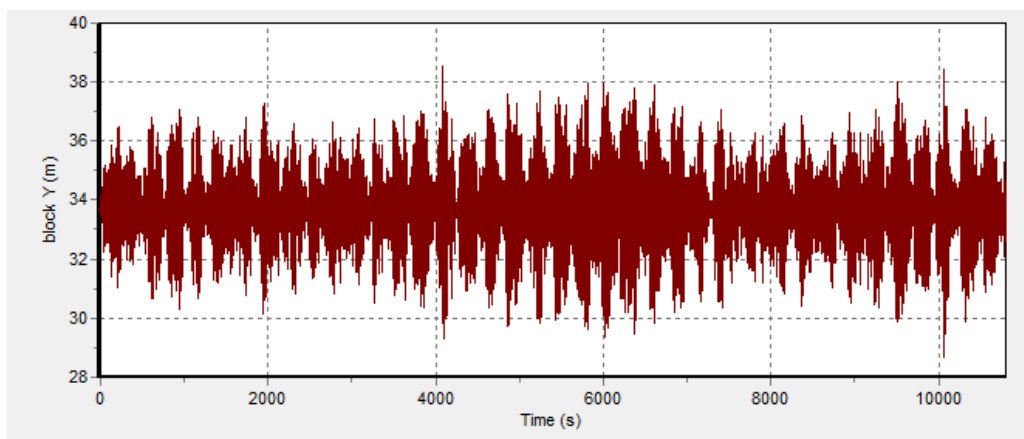
45 deg, Sumbu Z



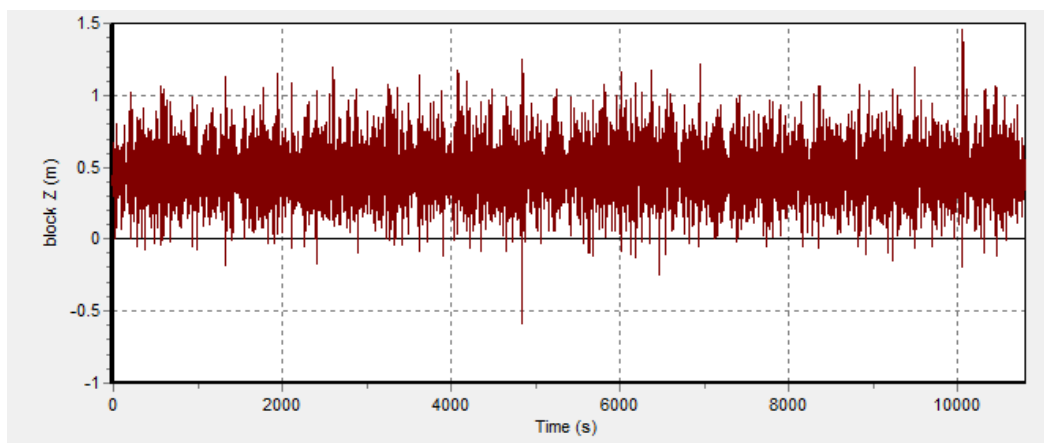
90 deg, Sumbu X



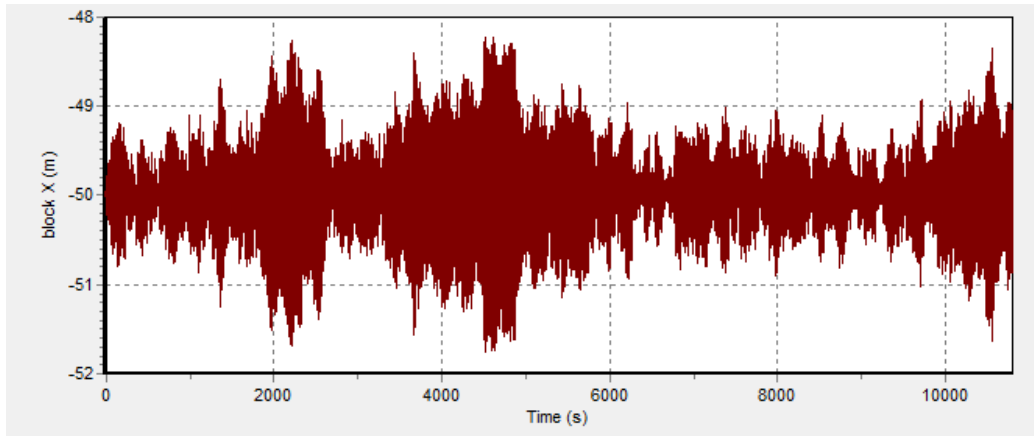
90 deg, Sumbu Y



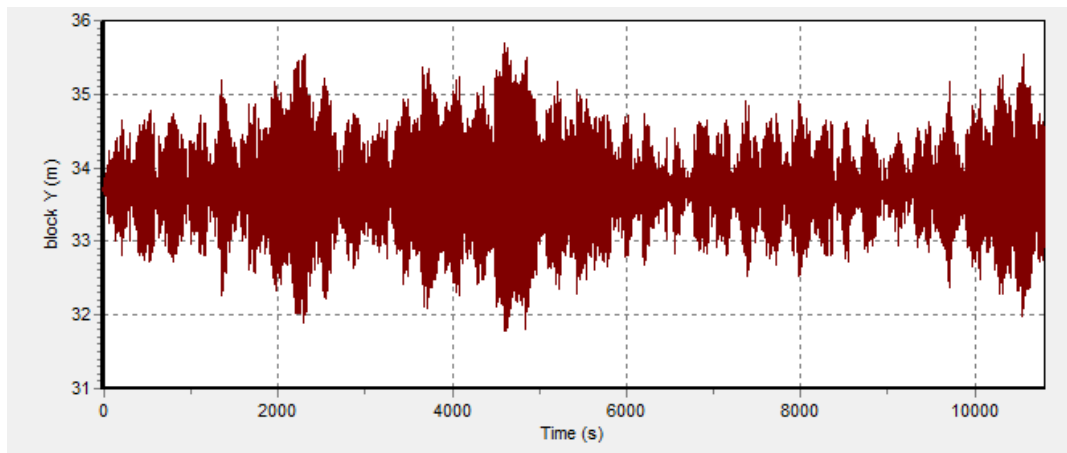
90 deg, Sumbu Z



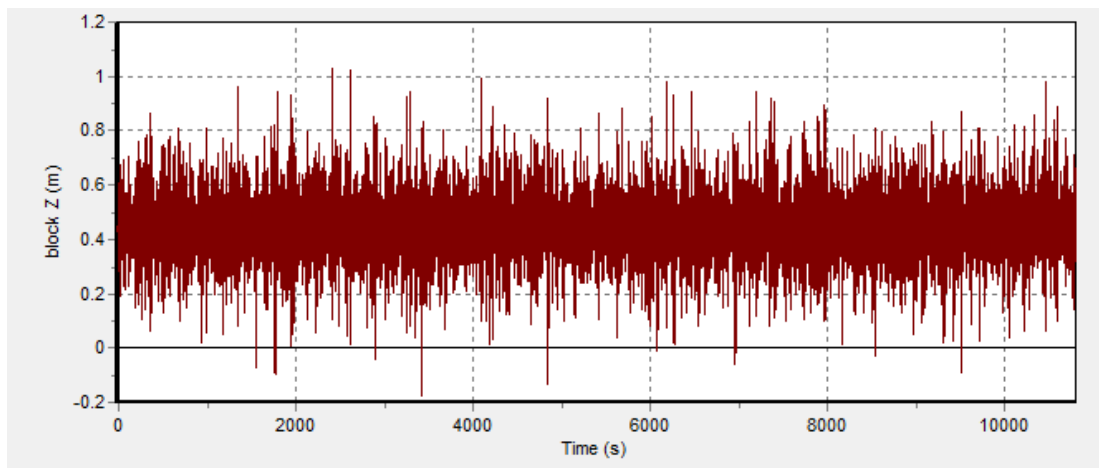
135 deg, Sumbu X



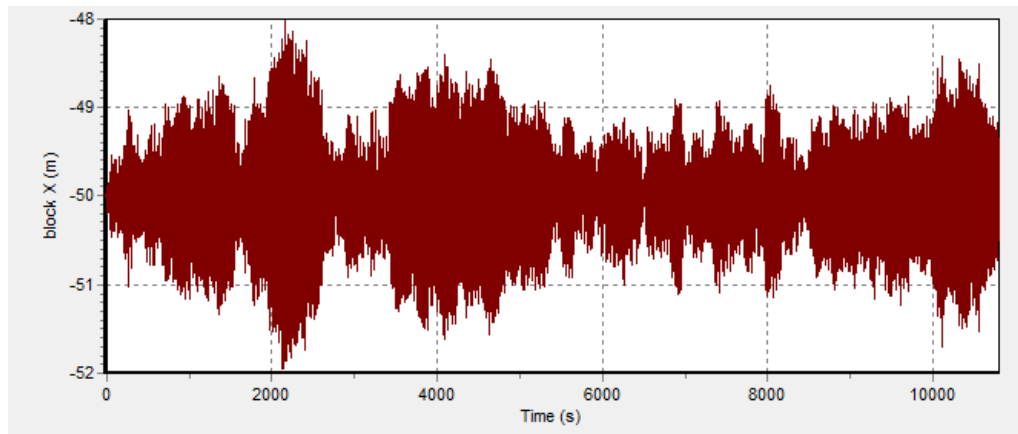
135 deg, Sumbu Y



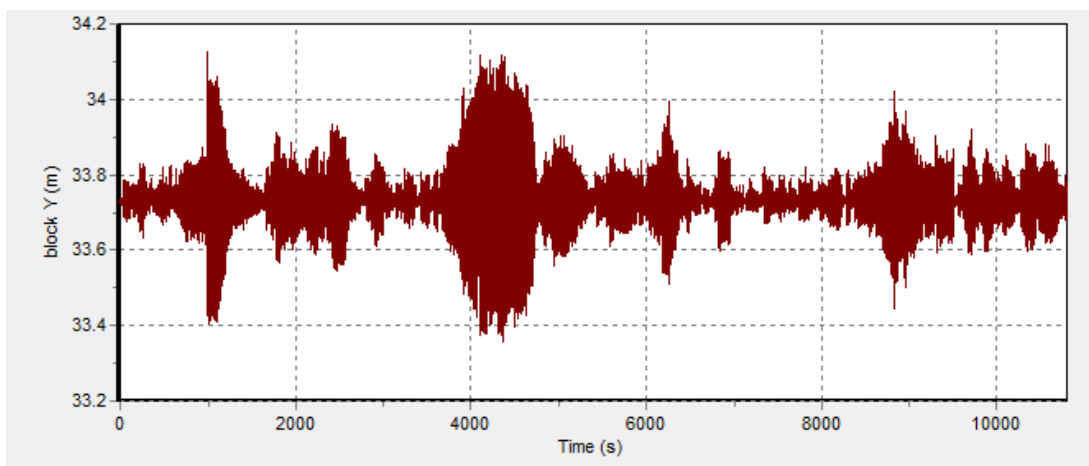
135 deg, Sumbu Z



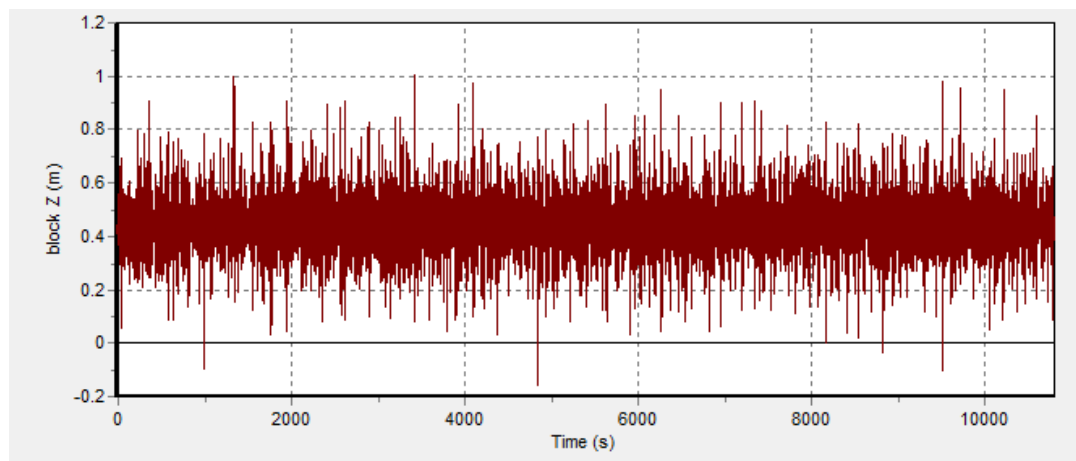
180 deg, Sumbu X



180 deg, Sumbu Y



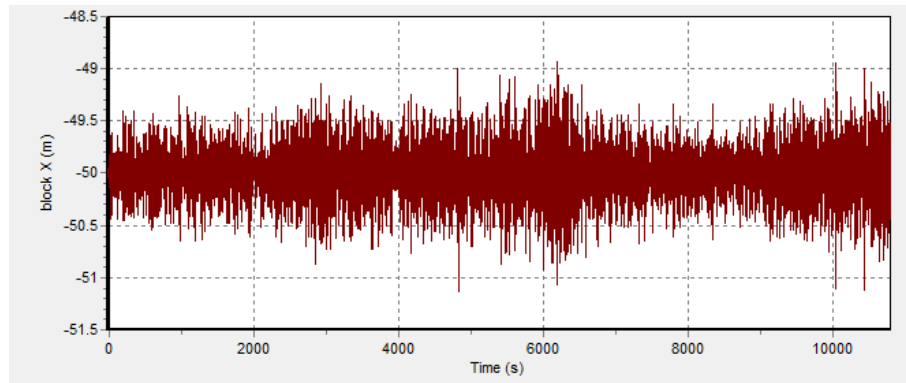
180 deg, Sumbu Z



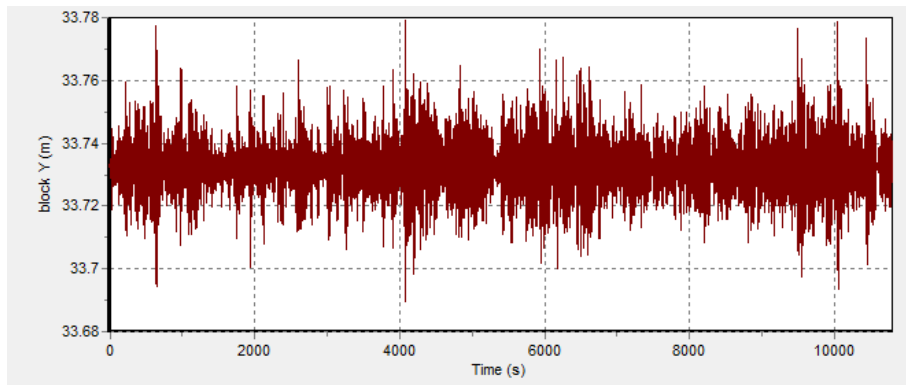
RESPONS GERAK STRUKTUR

$H_s = 3.8$ m, LOAD CASE 3

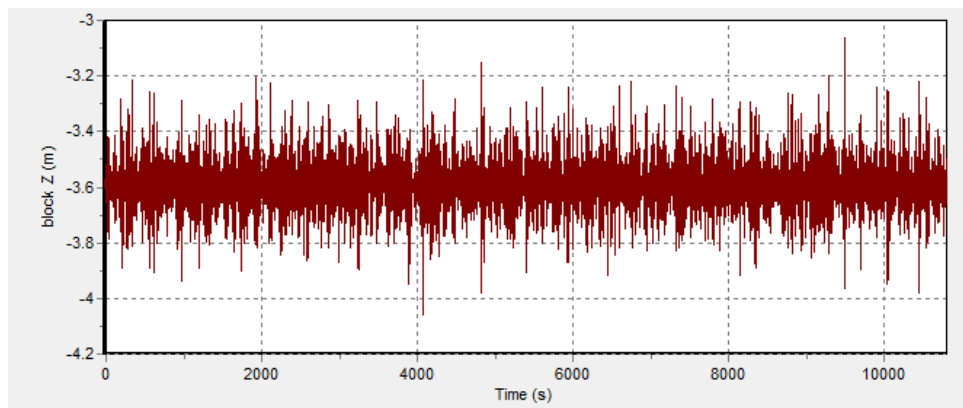
0 deg, Sumbu X



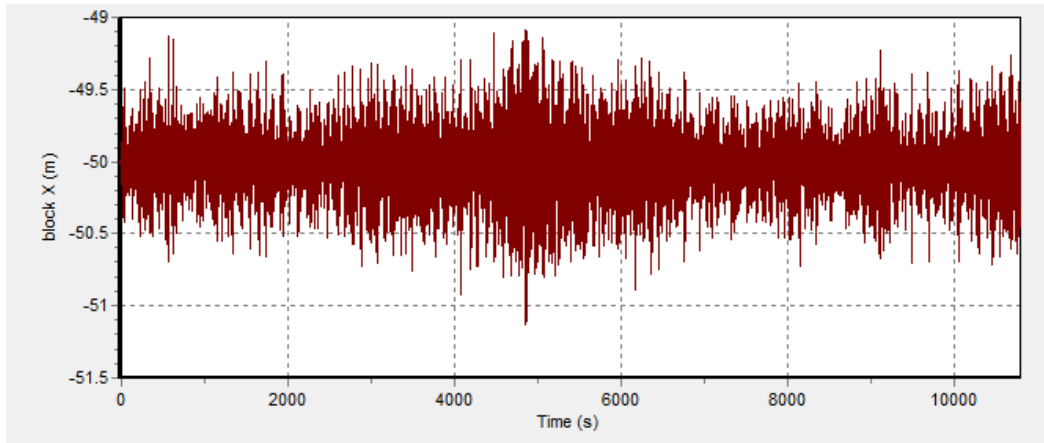
0 deg, Sumbu Y



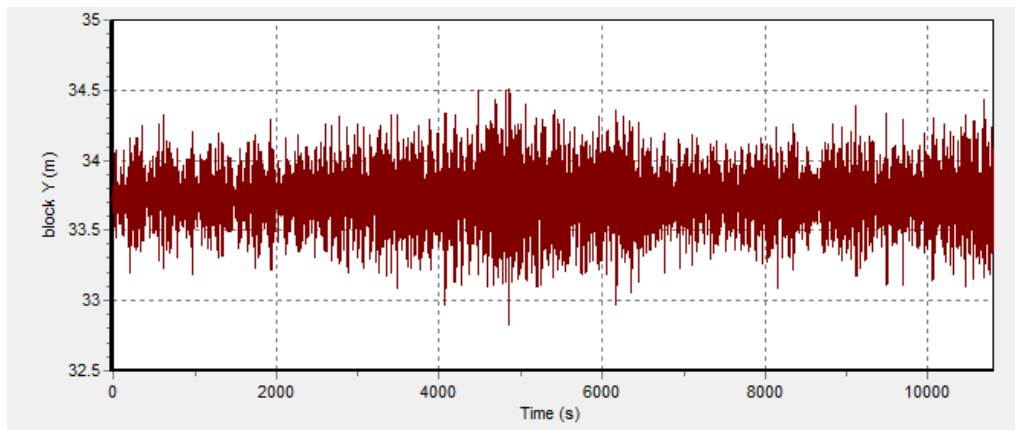
0 deg, Sumbu Z



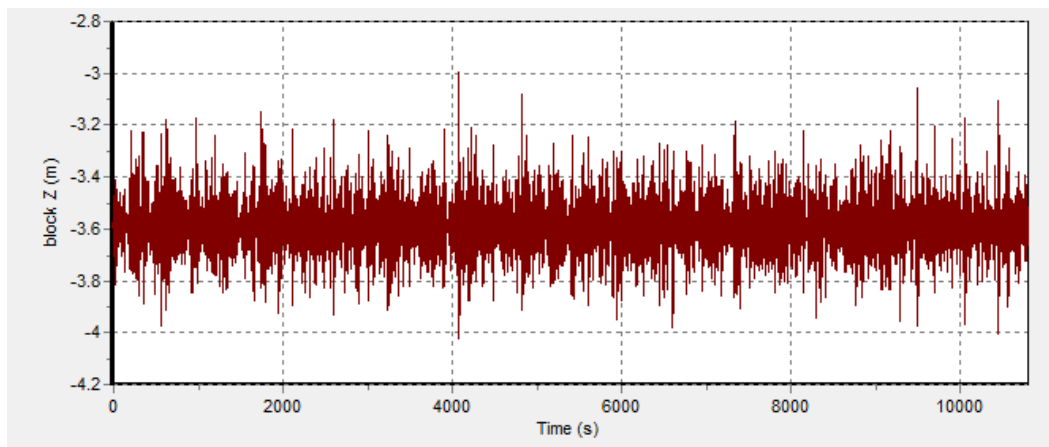
45 deg, Sumbu X



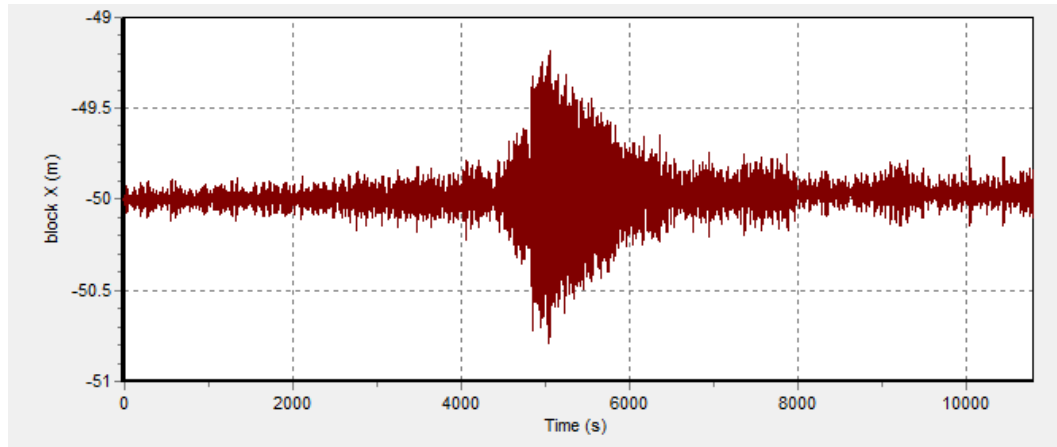
45 deg, Sumbu Y



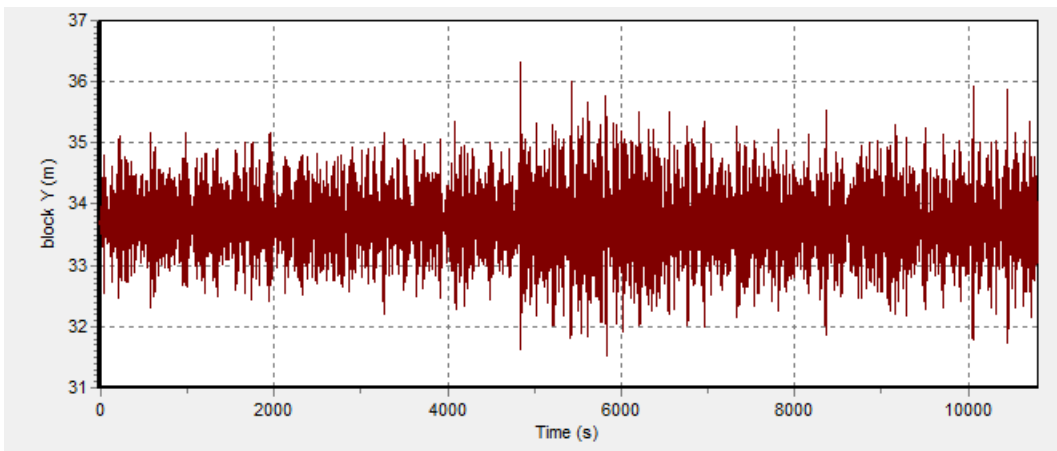
45 deg, Sumbu Z



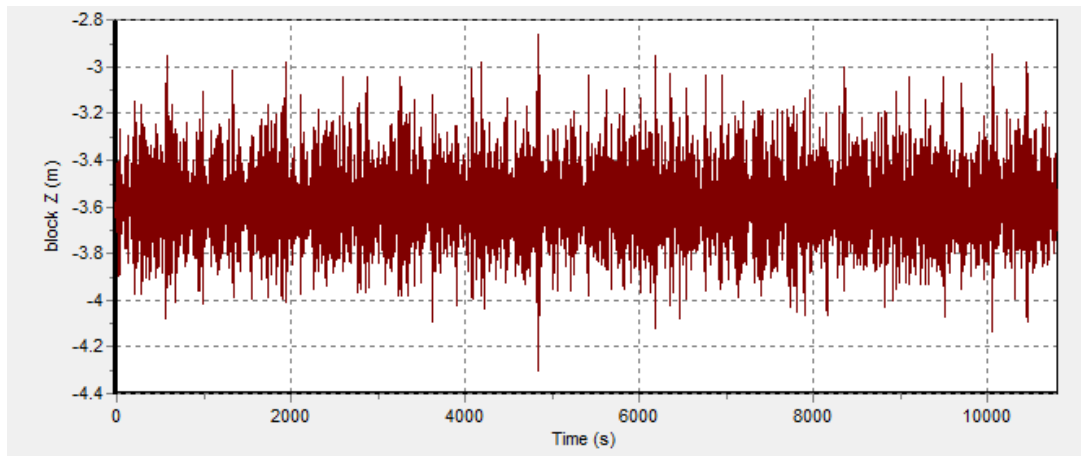
90 deg, Sumbu X



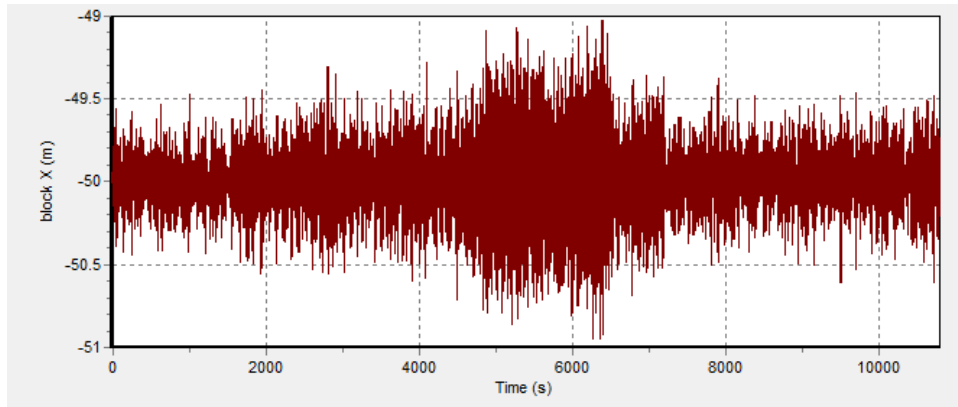
90 deg, Sumbu Y



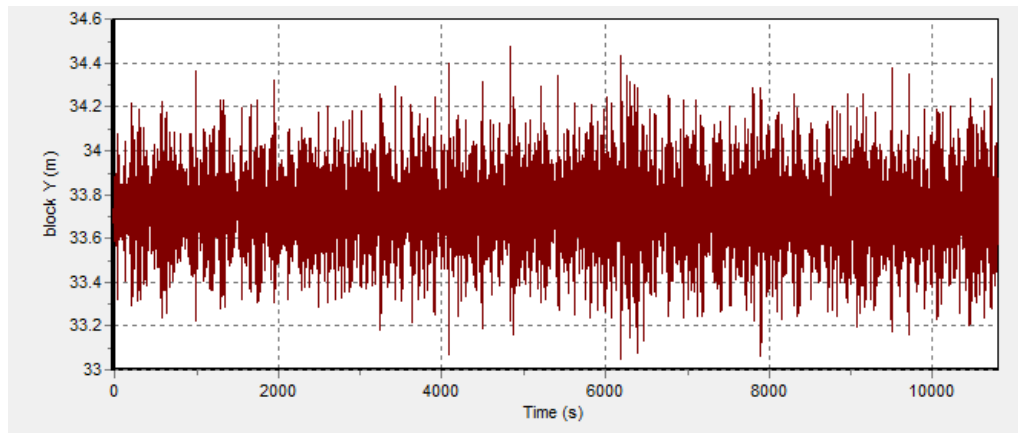
90 deg, Sumbu Z



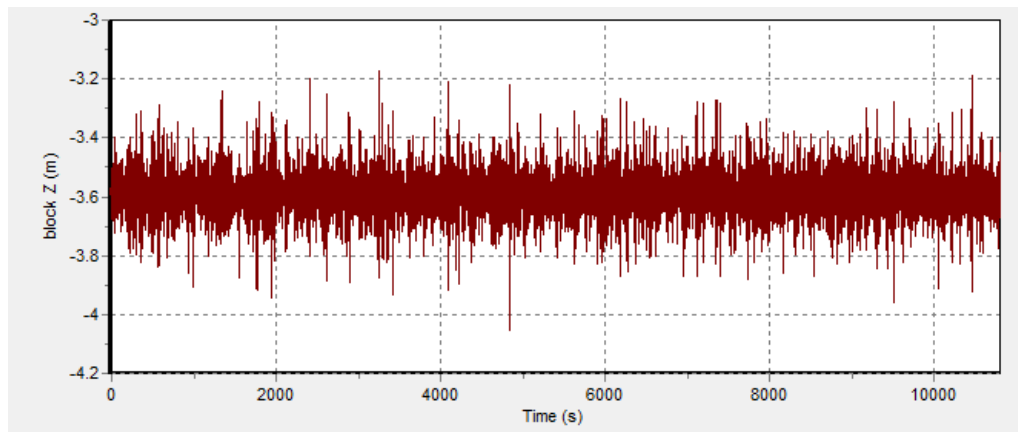
135 deg, Sumbu X



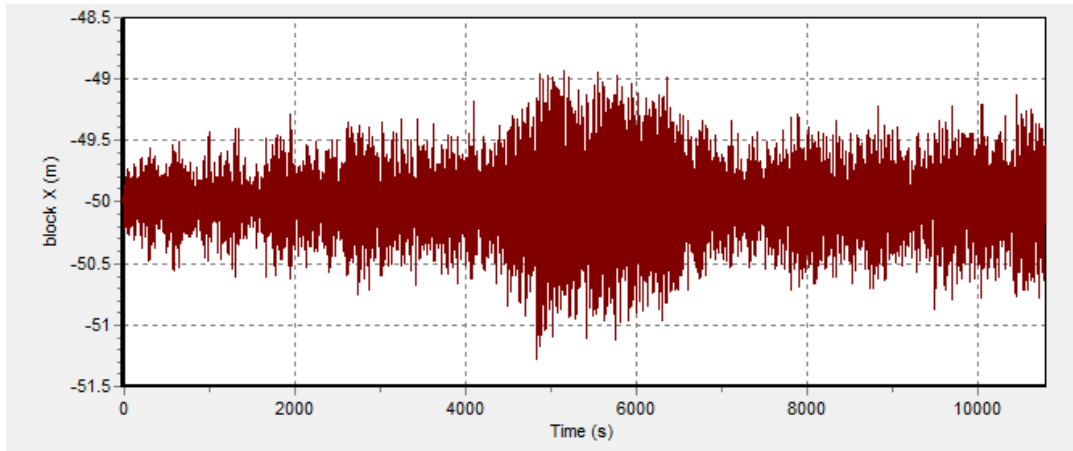
135 deg, Sumbu Y



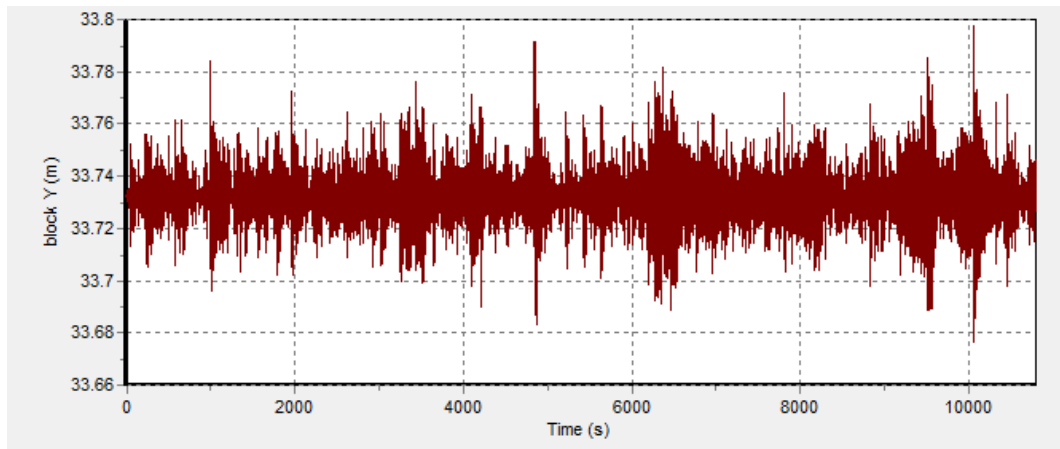
135 deg, Sumbu Z



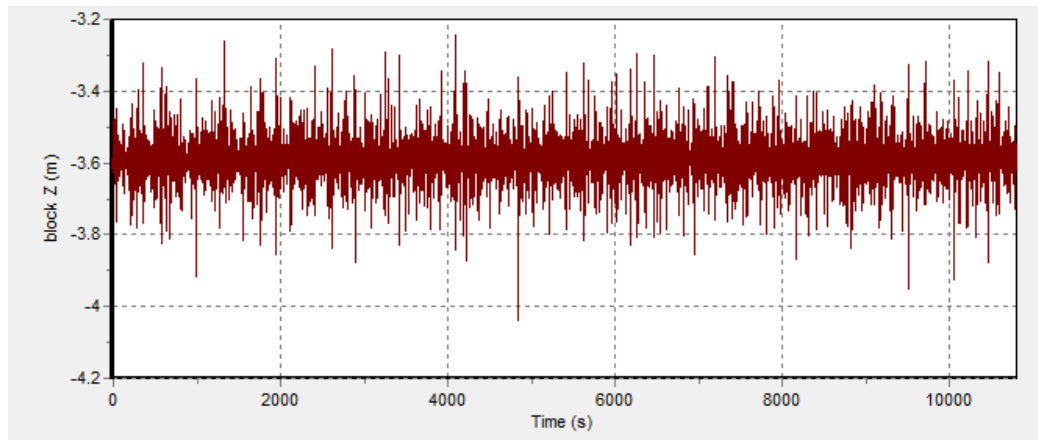
180 deg, Sumbu X



180 deg, Sumbu Y



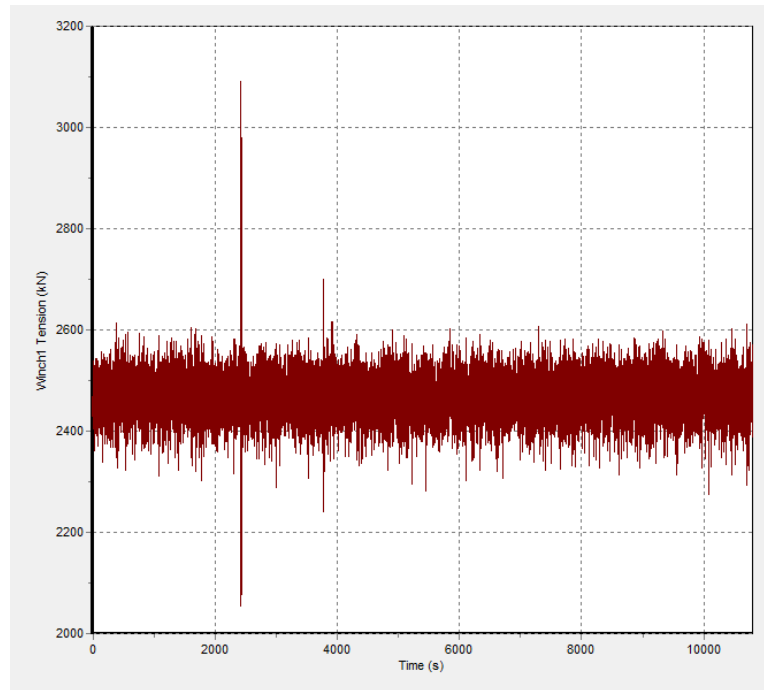
180 deg, Sumbu Z



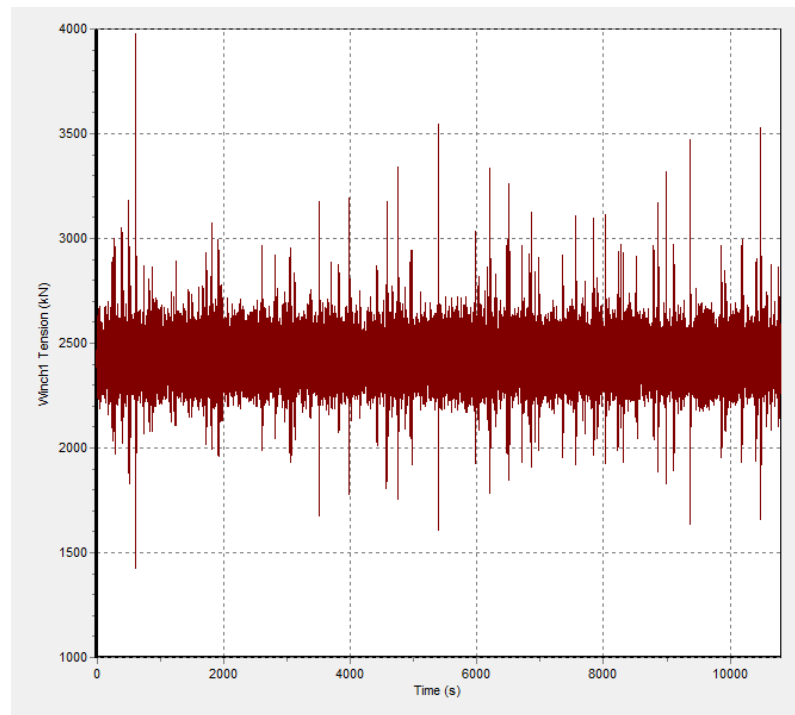
LAMPIRAN III
TIME HISTORIES TENSION

TIME HISTORIES TENSION
HEADING 90 DEG, LOAD CASE 1

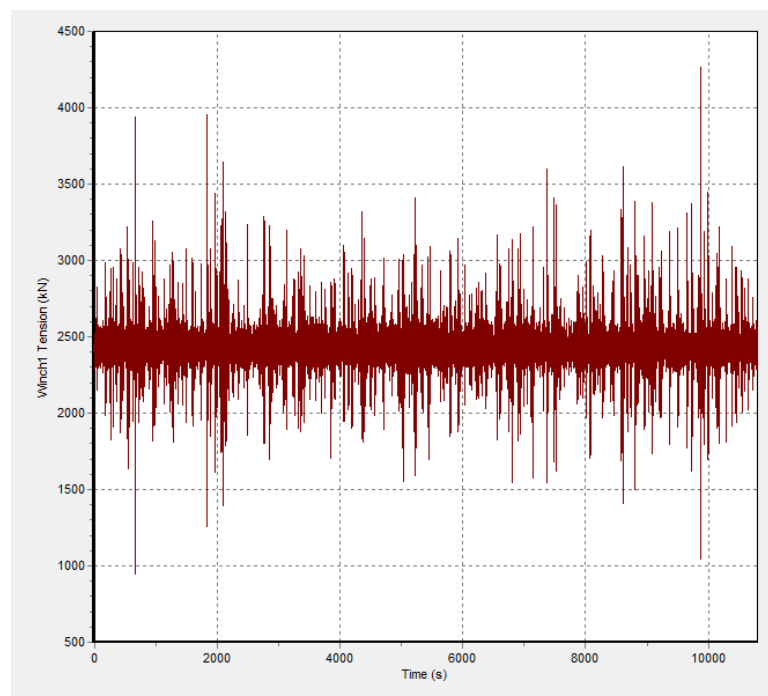
$H_s = 1.8$ m



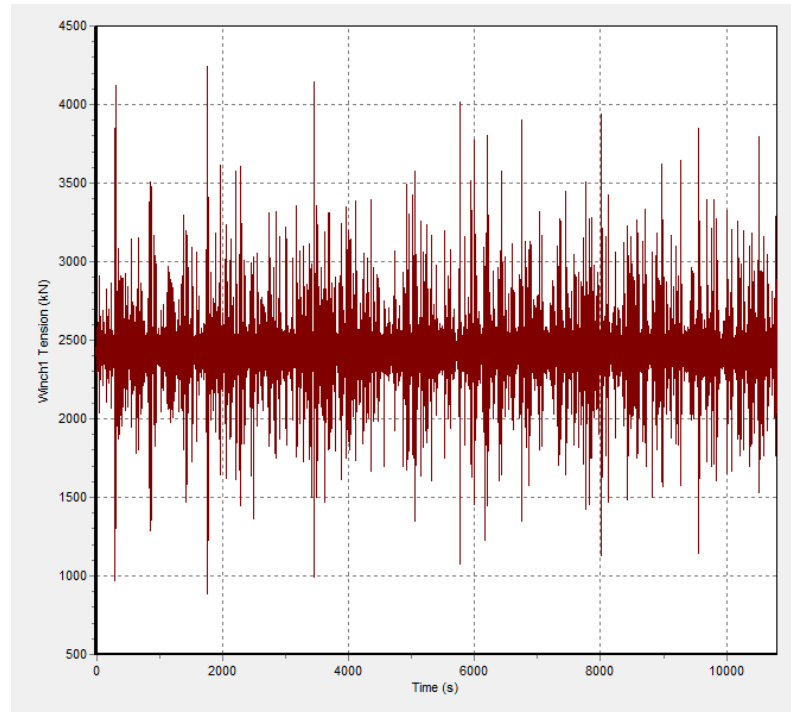
$H_s = 2.3$ m



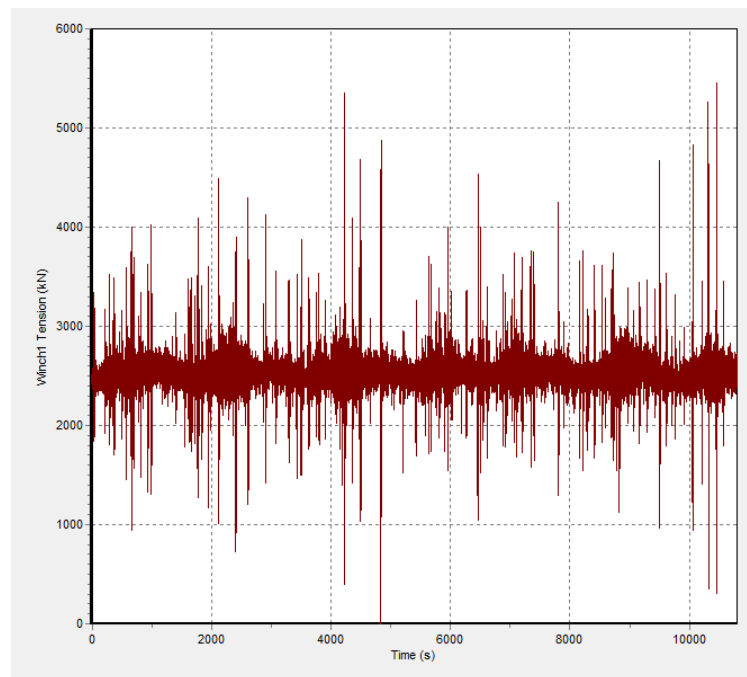
$H_s = 2.8$ m



$H_s = 3.3$ m



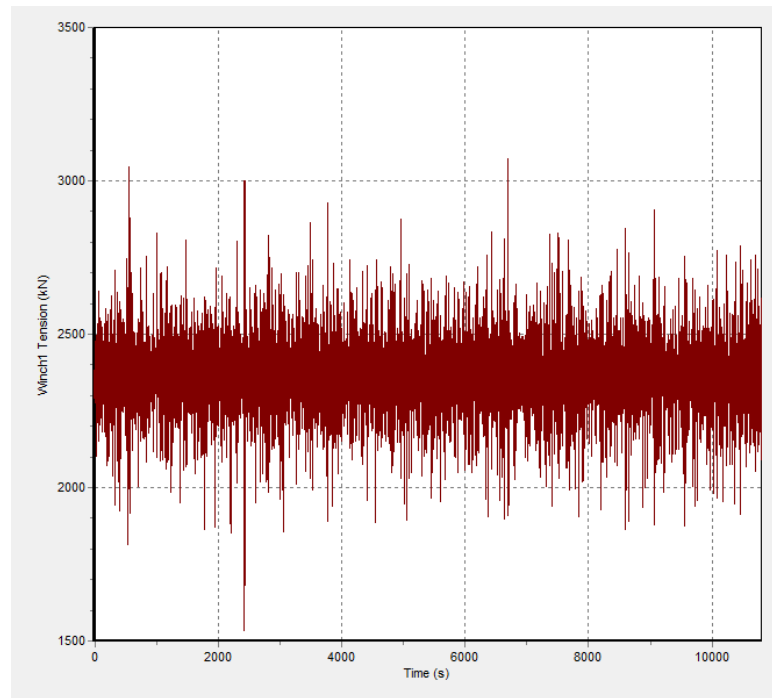
$H_s = 3.8$ m



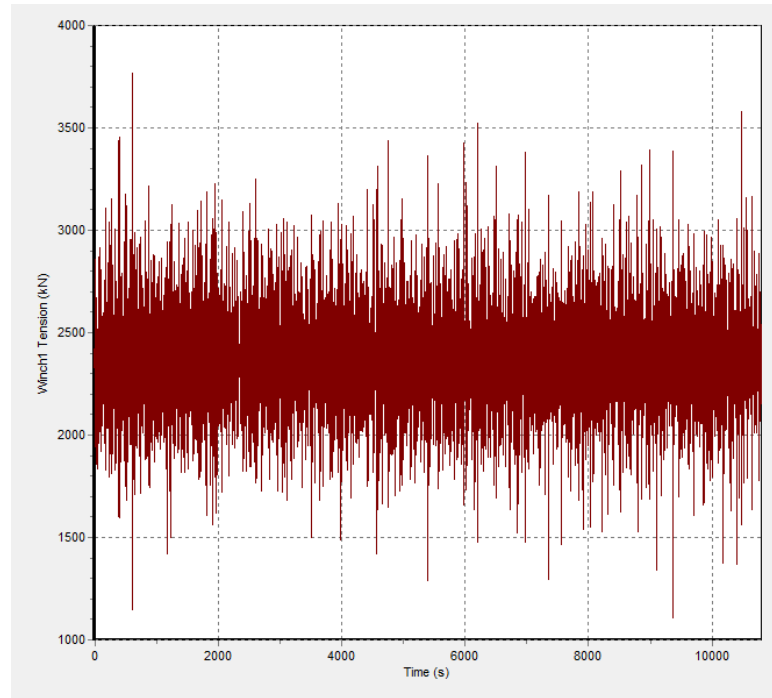
TIME HISTORIES TENSION

WAVE HEADING 90 DEG, LOAD CASE 2

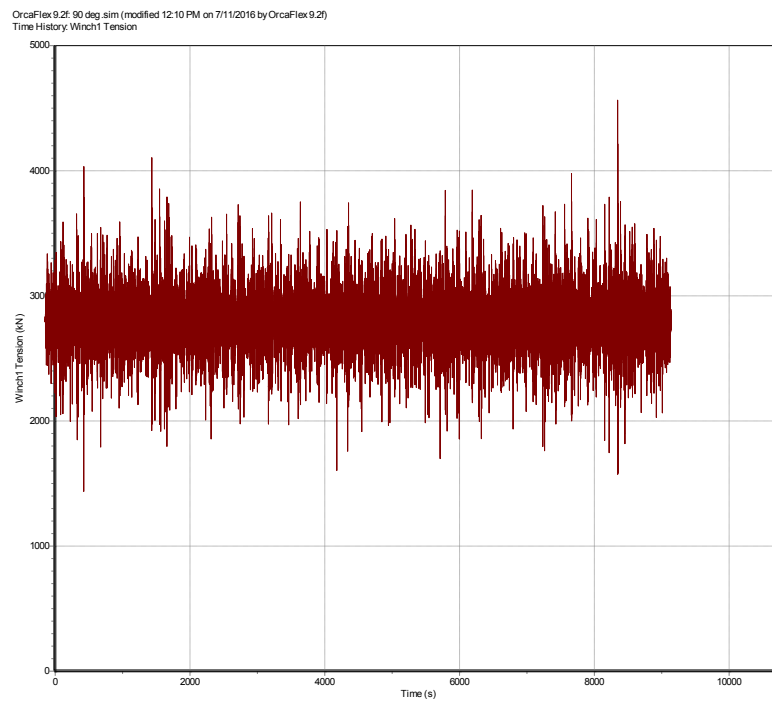
$H_s = 1.8$ m



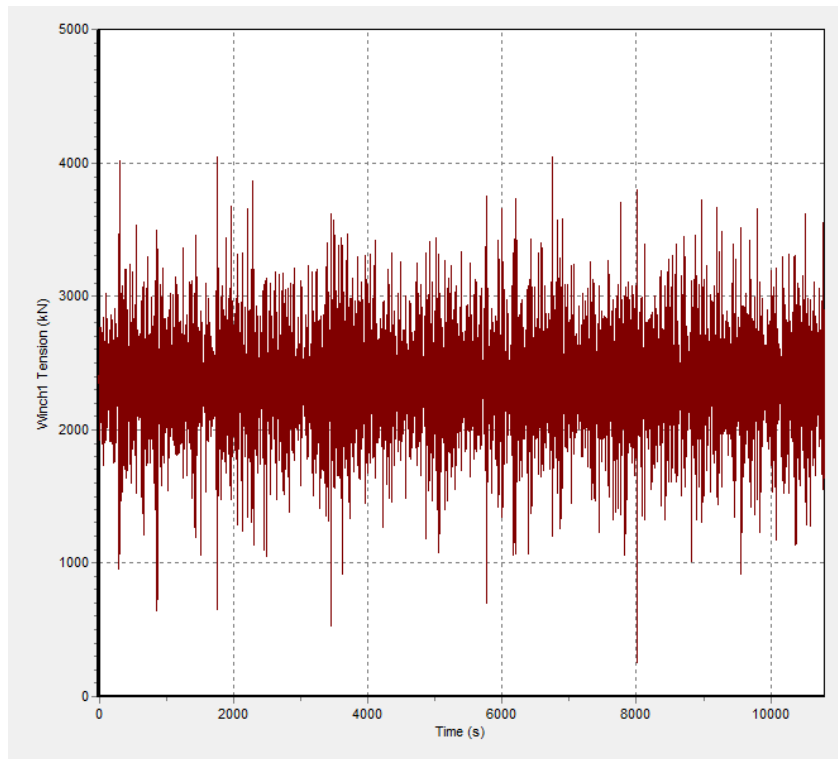
$H_s = 2.3 \text{ m}$



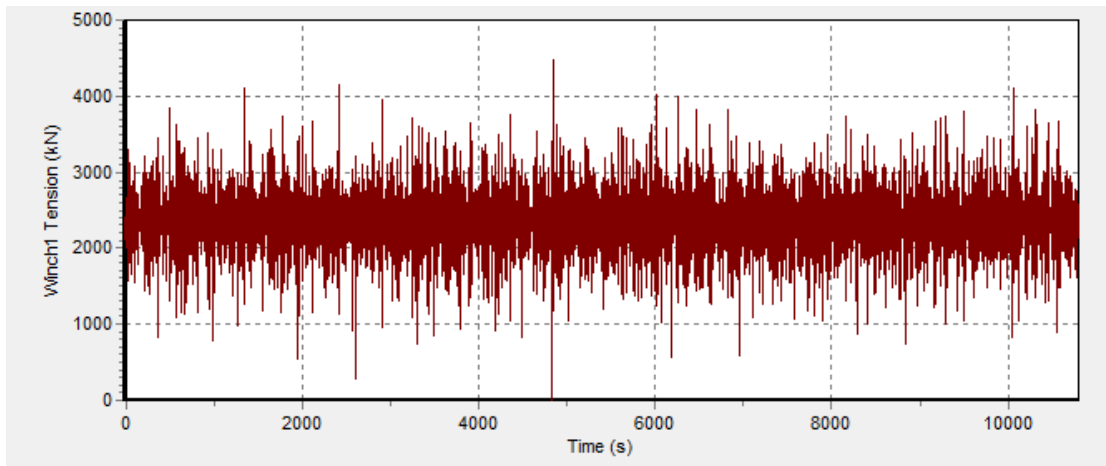
$H_s = 2.8 \text{ m}$



$H_s = 3.3$ m

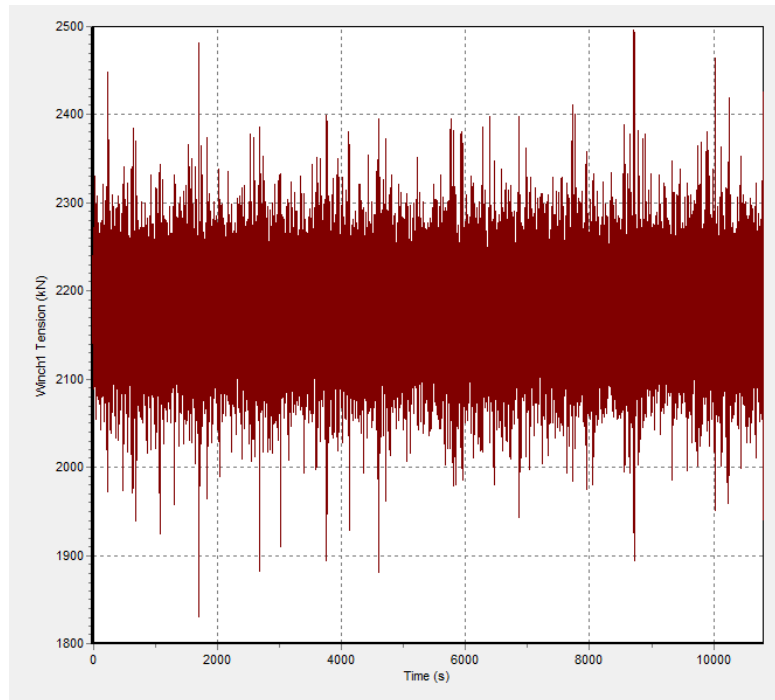


$H_s = 3.8$ m

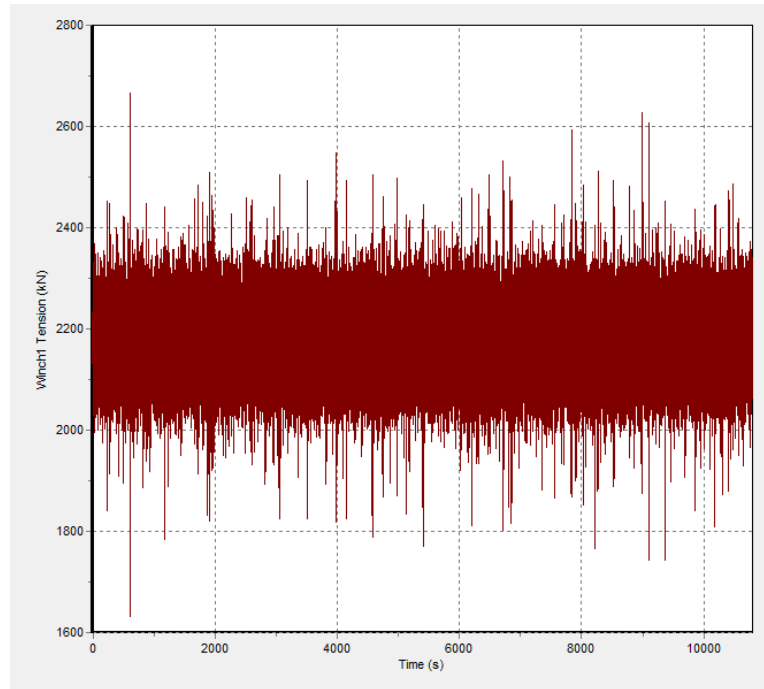


TIME HISTORIES TENSION
HEADING 90 DEG, LOAD CASE 3

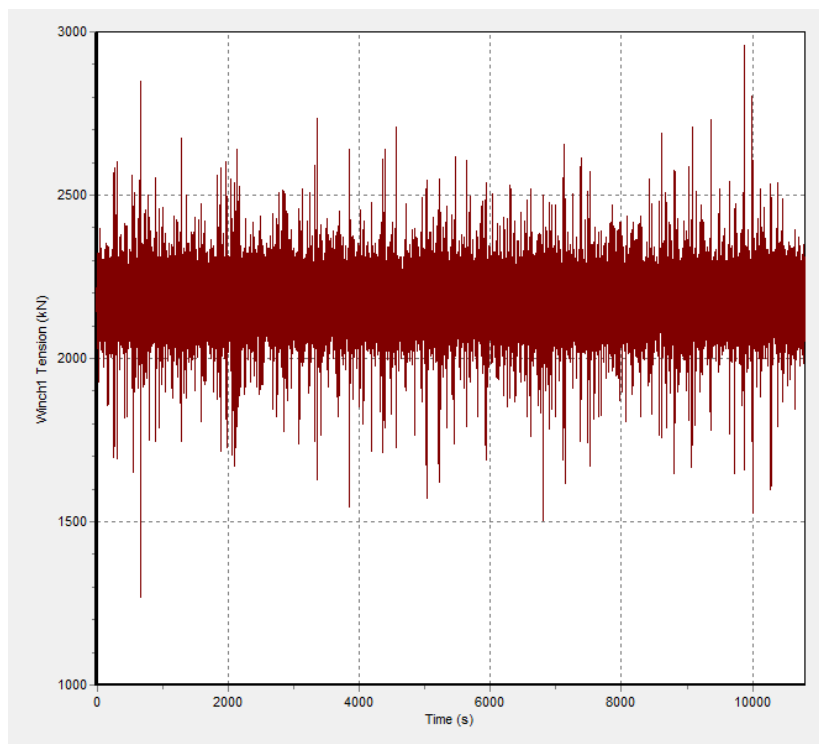
Hs = 1.8 m



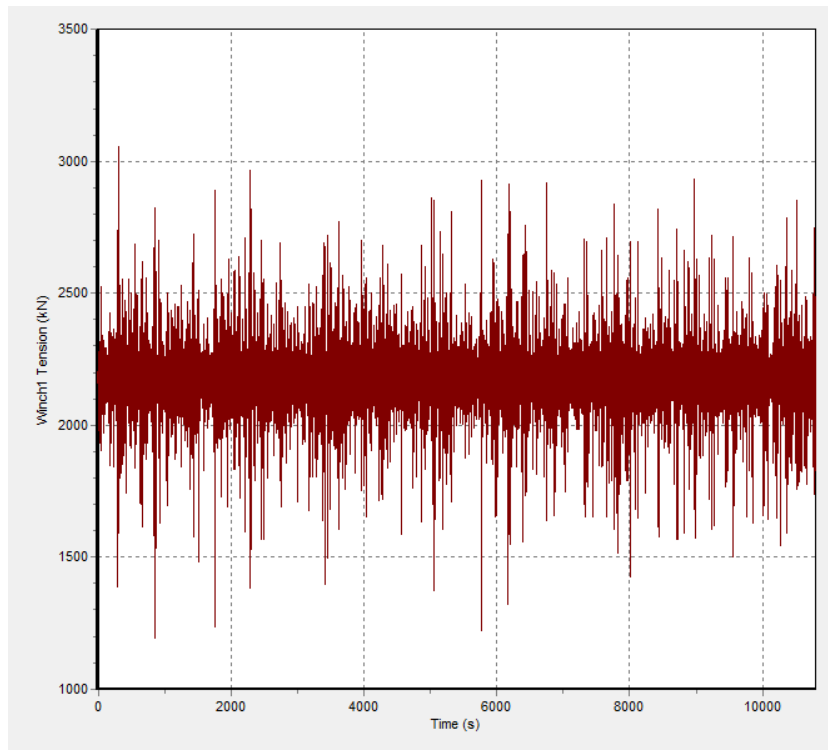
$H_s = 2.3 \text{ m}$



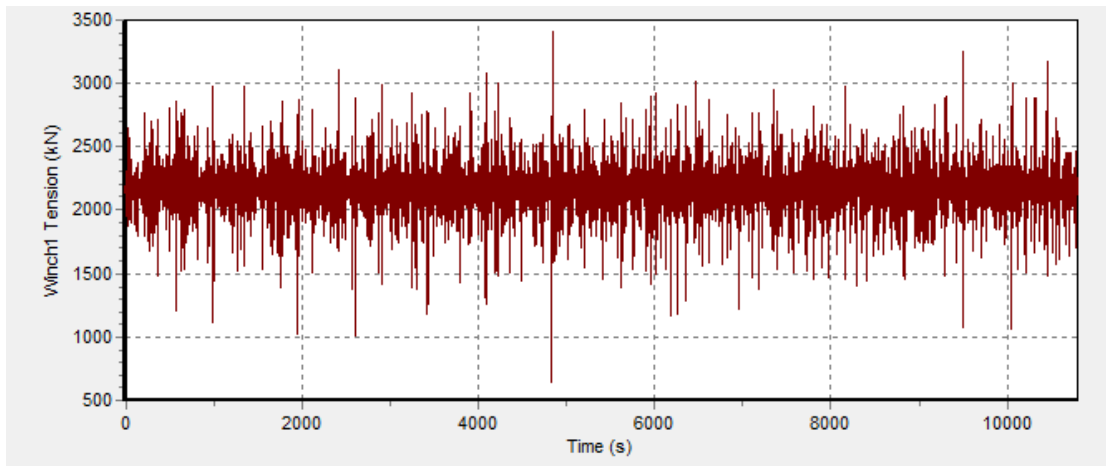
$H_s = 2.8 \text{ m}$



$H_s = 3.3$ m



$H_s = 3.8$ m



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis dinamis operasi penurunan *subsea manifold*, berikut adalah kesimpulan dari hasil-hasil yang telah didapatkan:

1. Respon gerak *subsea manifold* untuk tiap *load case* berbeda-beda, hal ini disebabkan oleh perbedaan beban hidrodinamis yang bekerja pada struktur untuk masing-masing *load case*. Respon gerakan struktur paling besar terjadi pada *Load Case 1*, yaitu ketika struktur tepat berada di atas permukaan air laut dengan tinggi signifikan gelombang $H_s = 3.8$ m dan arah datang gelombang 90° . Besar *offset* signifikan maksimum yang terjadi untuk masing-masing sumbu adalah: $X = 8.5$ m, $Y = 10.35$ m, dan $Z = 1.01$ m. Pada *Load Case 1*, *subsea manifold* bergerak bebas di udara dengan hanya bagian bawah struktur yang terkena air, pada kondisi ini beban gaya *drag* di dasar struktur kecil jika dibandingkan dengan *Load Case 2* dan 3, pada *Load Case 2* dan 3 struktur *subsea manifold* terkena beban *drag* dan *added mass* yang cukup besar sehingga pergerakan struktur dari posisi awalnya tidak sebesar gerakan pada *Load Case 1*.
2. *Tension* signifikan maksimum terjadi pada *Load Case 2*, yaitu ketika struktur sebagian berada di dalam air laut. Meskipun respons gerak struktur *subsea manifold* paling besar terjadi pada *Load Case 1*, namun beban-beban hidrodinamis yang bekerja pada *Load Case 2* jauh lebih kompleks sehingga membuat nilai *tension* signifikan pada *Load Case 2* menjadi yang paling besar dibandingkan dengan *Load Case* lainnya. Pada *Load Case 2*, terjadi kegagalan pada sling saat $H_s = 3.3$ m dan $H_s = 3.8$ m. *Tension* signifikan maksimum yang bekerja pada *sling* terjadi pada *Sling 1* dengan harga 891.3 kN untuk $H_s = 3.3$ m dan 914 kN untuk $H_s = 3.8$ m.

3. Mengacu pada hasil analisis dan kriteria operasi penurunan yang terdapat pada DNV RP-H103, maka batasan *sea-state* maksimum di mana operasi dapat dijalankan dengan aman untuk arah datang gelombang 90° adalah pada tinggi signifikan gelombang $H_s = 2.8$ m, tidak disarankan untuk melakukan operasi di atas batas tinggi signifikan gelombang yang telah ditentukan.

5.2 SARAN

Berikut adalah saran yang penulis berikan bagi pembaca yang tertarik untuk mengambil tugas akhir dengan topik penurunan *subsea structure*:

1. Mempertimbangkan beban angin untuk lifting di udara bagi struktur yang memiliki permukaan luas.
2. Mempertimbangkan beban arus untuk operasi penurunan *subsea structure* ke dasar laut.
3. Memodelkan kapal dalam posisi tertambat.
4. Menggunakan *software* MOSES untuk melakukan simulasi *time domain* operasi penurunan.
5. Melakukan analisis kekuatan struktur *subsea manifold* ketika terkena beban hidrodinamis dengan *software* ANSYS.

Daftar Pustaka

- Bai, Yong dan Bai, Qiang. 2010. Subsea Engineering Handbook. Elsevier. Houston, USA.
- Boe, Tormod. 2011. DNV Marine Operations' Rules for Subsea Lift Operations. DNV Marine Operation, Norway.
- Bjerkholt, R. F. 2014. Analysis of ROV Lift Operation. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim, Norway.
- Djarmiko, E. B. 2012. Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak, ITS Press, Surabaya, Indonesia.
- DNV RP-C205. 2014. Environmental Conditions and Environmental Loads. Det Norske Veritas. Norway.
- DNV RP-H103. 2011. Modelling and Analysis of Marine Operations. Det Norske Veritas. Norway.
- Faltinsen, O. M. (1990). Sea Loads on Ships and Offshore Structures. Cambridge Ocean Technology Series. Cambridge University Press.
- Hosaas, Arnstein. 2010. Engineering Optimization by using the Simplified Method for Lifting through the Splash Zone. Subsea 7.
- Kopsov, I. E. and Sandvik, P. (1995). Analysis of subsea structure installation. In Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, volume 1.
- Orcina (2013). OrcaFlexManual, Version 9.6a. Orcina Ltd.
- Øritsland, O. and Lehn, E. (1987). Hydrodynamic Forces on Subsea Modules during Lifting Operations. In Third International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, volume 1.

- Øritsland, O. and Lehn, E. (1989). Hydrodynamic Forces and Resulting Motion of Subsea Modules during Lifting in the Splash Zone. In Eight International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, volume 2.
- Sandvik, P., Lieng, J., and Lunde, S. (1993). Analysis of the dynamics during installation of subsea structures. In Offshore 93: Installation of Major Offshore Structures, volume 105.
- Sarkar, A. and Gumestad, O. T. (2010). Splash zone lifting analysis of subsea structures. In *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, pages 303–312. American Society of Mechanical Engineers.

BIOGRAFI PENULIS



Dedy Ompu Sunggu, sulung dari lima bersaudara, lahir di Batam, 6 Januari 1994. Penulis tumbuh dan besar di Kota Batam, yang secara tidak langsung membuat Penulis familiar dengan industri bangunan lepas pantai sejak dini. Lulus dari SMA N 03 Batam, Penulis melanjutkan studi S1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama di ITS penulis aktif di organisasi Persekutuan Mahasiswa Kristen (PMK) ITS sebagai kakak bimbing, Penulis juga pernah mengikuti Young Engineers and Scientists Summit (YESS), serta mengikuti banyak pelatihan dan seminar di kampus. Penulis memiliki minat di bidang hidrodinamika dan struktur lepas pantai, pengalaman Penulis melakukan analisis *lifting* ketika mengikuti kerja praktek-pun akhirnya menghantarkan Penulis untuk mengambil tugas akhir dengan judul, “*Analisis Dinamis Operasi Penurunan Subsea manifold*”.